

第IV部

長周期地震動に対する実大免震部材の特性評価(1)

第1章 震動台を用いた実大免震部材の構造実験（その1）

1.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数回繰り返し加力実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的とする。実大免震部材の動的・多数回繰り返し加振実験は、試験装置能力の制約により従来殆ど実施されておらず、本実験により実大免震部材のエネルギー吸収性能を把握することは、長周期地震動に対する免震建築物の安全性向上に大きく寄与することが期待される。

本章では、縮小試験体の多数回繰り返し実験の条件を踏まえて作成した、実大試験体の多数回繰り返し実験及び実大試験体の破断相当歪（ $\pm 90\text{cm}$ 、450%）までの実験実施計画について示すとともに、実大免震部材（弾性すべり支承（高摩擦）およびオイルダンパー）の動的加振実験結果および実大免震部材（鉛プラグ入り積層ゴム）の静的加振実験結果を示す。

1.2 実験手法の提案

1.2.1 実験条件の設定

過去に実施された実大実験の実験条件を考慮して、それらと同等以上の実大実験の免震部材を使用することとし、積層ゴム支承はφ1000、弾性すべり支承はφ800の大きさを想定する。弾性すべり支承は、積層ゴム支承よりも基準面圧が大きく、せん断力（摩擦力）が軸力に依存して変動するため、一定以上のせん断力を確保するため直径を小さめに設定する。

実大実験に関する議論を踏まえ、実験条件には以下の優先順位を付ける。

- 1) 長時間・大振幅動的繰り返し加力
- 2) 鉛直載荷
- 3) 水平2方向加力
- 4) 破断実験

1) の長時間・大振幅繰り返し加力については、加振振幅は、φ1000の積層ゴム支承で、±40cm（せん断歪200%）程度とし、加振時間は、4秒周期で30回～60回（累積変形で50m～100m）程度とする。これらの条件は、第Ⅲ部第1章に記載した実施した縮小免震部材の試験条件と整合させる。

2) 鉛直載荷については、実面圧相当を目標とするが、ロードセルが許容荷重を越えない範囲で5000kNに設定した（参考資料2.5.4）。面圧変動の許容値は、目標としては±20%程度を目指すこととするが、震動台の制御精度を予備加振により確認し、実現可能な精度で最終的に決定する。

FEM解析結果（参考資料2.5.4）によれば、当初計画の上部鋼板100mmでは10000kNの鉛直載荷時に中央部ロードセル荷重が許容荷重の2倍程度に達する。許容荷重を越えないようにするには、上部鋼板を200mmに厚くした上で、中央付近のロードセルを油圧ジャッキに置き換える必要がある。

油圧ジャッキを使用することにより10000kN載荷は可能ではあるが、軸力が何らかの理由で解放された時に、ロードセルに許容値以上の引張荷重が作用する可能性がある。従って、長時間・繰り返し実験には適用出来る可能性があるが、破断実験には採用出来ない。

油圧ジャッキ無しで可能な範囲をFEM解析と実際の予備加振により見極めて、加振条件を設定することとする。長時間・繰り返し実験について、可能であれば油圧ジャッキによる加振も試験的に行うこととする。

3) の水平2方向加力については、高減衰ゴム系積層ゴム支承では、1方向加力と2方向加力では特性に差があることが知られているため、2方向加力が行えるようにする。

4) 破断実験については、±90cm程度まで漸増加振を行うこととし、破断しない場合はそれ以上の振幅増加はさせないこととする。積層ゴムの破断せん断力として6000kN程度が想定される。

以上の実験条件を整理して、表1.2-1に示す。

表 1.2-1 実験条件の設定

実験条件	目標値	留意点
試験体寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・積層ゴム：φ1000 ・弾性すべり支承：φ800 	<ul style="list-style-type: none"> ・弾性すべり支承は、積層ゴムよりも基準面圧が大きいため、直径を小さく設定。
長時間・大振幅動的繰り返し加力	正弦波加振： <ul style="list-style-type: none"> ・±40cm ・4秒周期で30回～60回（累積変形で50m～100m） 地震波加振： <ul style="list-style-type: none"> ・長周期地震動模擬波に対する免震建築物応答波を使用する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・φ1000 積層ゴムでせん断歪 200%相当。 ・主梁方向を基本とする。 ・必要に応じて高次振動数成分をフィルター処理する。
鉛直载荷	<ul style="list-style-type: none"> ・最大 5000kN* 	<ul style="list-style-type: none"> ・面圧変動の許容値は±20%程度を目標とするが、震動台の制御精度により決定する。
水平2方向加力	<ul style="list-style-type: none"> ・円軌道で円周 160cm 	<ul style="list-style-type: none"> ・正弦波は、円軌道とする。 ・地震波は、2方向応答波を使用する。
破断実験	<ul style="list-style-type: none"> ・±90cm（せん断歪 450%）まで漸増加振（破断時の荷重は 6000kN、衝撃力 9000kN 程度） 	<ul style="list-style-type: none"> ・受け梁方向に加振する。 ・破断に至らない場合、それ以上振幅を増加させない。

*ロードセルの許容荷重を考慮して設定する。予備解析として鉛直加力時及び鉛直加力+水平加力時のロードセルにかかる荷重分布を3次元 FEM 解析で検討し（参考資料 2.5.4 参照）、载荷可能な鉛直軸力を設定し、実際の加振時に検証を行った。

1.2.2 実験手法の選定

(1) 実験手法の案

1.2.1 で設定した実験条件を実現するために、以下に示す 4 種類の実験手法のアイデアについて検討を行った。

(A 案) 上部反力梁方式

震動台上部に反力梁を架設し、震動台を上昇させて反力梁の間に免震支承を挟んで鉛直軸力を導入した上で、水平方向に加力する。震動台中央部に梁を架設するとスパンが長くなりすぎるため、コーナー部に斜め方向に梁を架設する。上部反力方式のイメージを図 1.2.2-1 に示す。

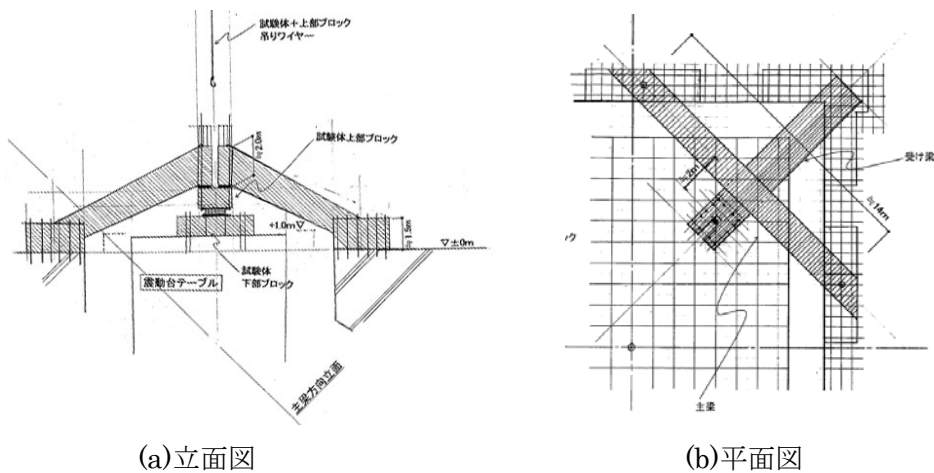


図 1.2.2-1 上部反力梁方式

(B 案) 慣性マス方式

震動台中央部に免震支承を設置し、免震支承上に重錘を積載して、震動台による加振を行う。重錘に生じるロッキング動を極力低減させるため、免震支承の中心の高さが重錘慣性力の作用高さと一致するように配慮する。震動台加振時の重錘のロッキング動を受けるため、周辺 4 箇所に補助支承を設ける。慣性マス方式のイメージを図 1.2.2-2 に示す。

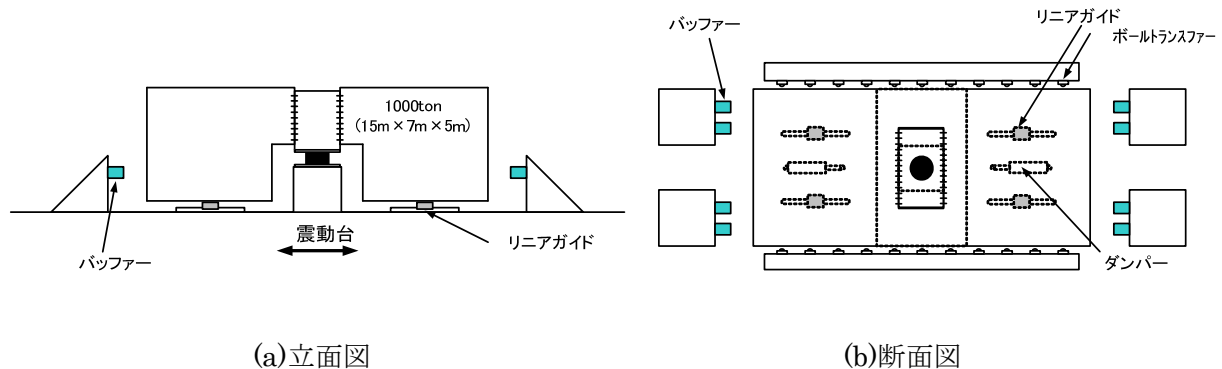


図 1.2.2-2 慣性マス方式

(C 案) 外部水平反力方式

震動台上部に自己反力式の鉛直加力フレームを設置して、ローラー支承上に設置した免震支承に油圧ジャッキで鉛直軸力を導入し、免震支承は震動台周辺に設置した水平反力ブロックと PC 鋼棒（或いは PC より線）で繋結する。震動台を水平方向に加振して、免震支承に水平方向の加力を行う。外部水平反力方式のイメージを図 1.2.2-3 に示す。

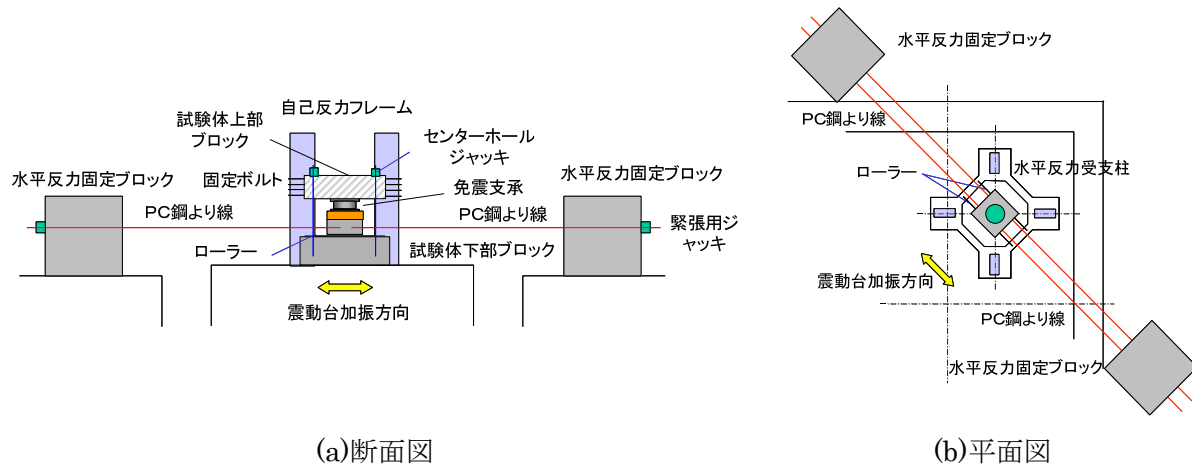


図 1.2.2-3 外部水平反力方式

(C2 案) 外部設置方式

震動台周辺の反力床上に自己反力式の鉛直加力フレームを設置して、ローラー支承上に設置した免震支承に油圧ジャッキで鉛直軸力を導入する。この機構は (C 案) と同様であるが、設置位置が異なる。震動台と免震支承をつなぎ梁で接続し、震動台を加振することによりつなぎ梁を介して免震支承を水平方向加力する。外部設置方式のイメージを図 1.2.2-4 に示す。

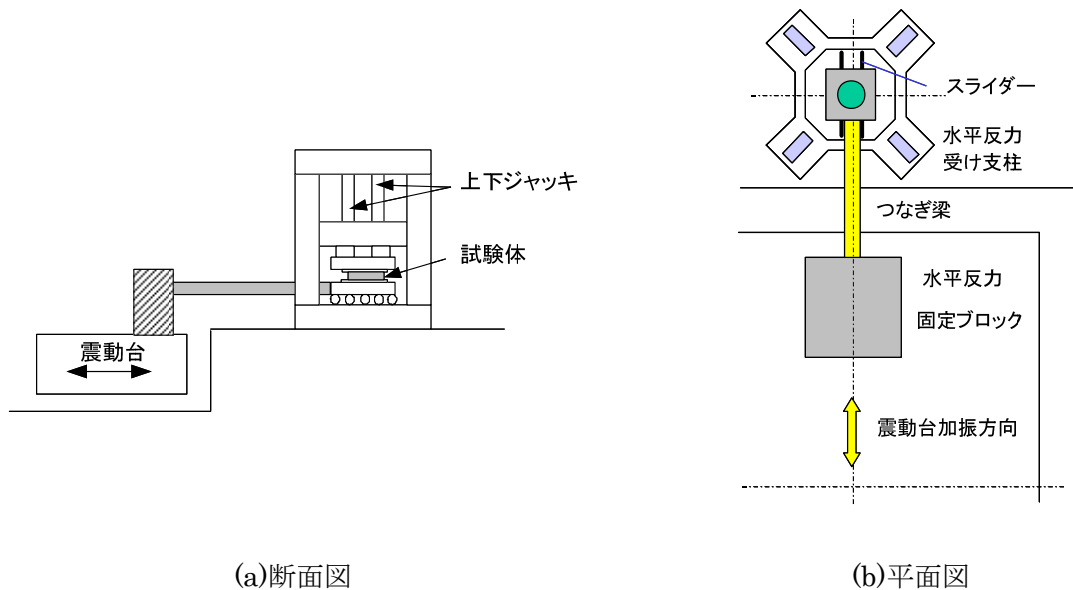


図 1.2.2-4 外部設置方式

(2) 実験手法の比較検討

実験手法を選定するにあたっては、先ず 1.2.1 に示した 4 つの実験条件（長時間・大振幅動的繰り返し加力、鉛直載荷、水平 2 方向加力、破断実験）を実現出来ることが、重要な選定基準となる。

1) 長時間・大振幅動的繰り返し加力について

全ての実験手法で実現可能である。ただし、(B 案) の場合は免震部材の減衰性能の差などにより加振応答に差が生じるため、異なった免震部材に対して同じ実験条件で実験を実施するには手間がかかると考えられる。

2) 鉛直載荷

全ての実験手法で実現可能である。ただし、(A 案) では震動台を変位制御で上昇させて、免震支承を反力梁に押付けるため、初期軸力は精度良く設定可能と考えられるが、水平加力時には振動台の上下変位に伴い、免震支承に軸力変動が生じることが予想される。また、(B 案) では、加振中に周辺部の補助支承に荷重が分散するため、この場合も軸力変動が生じることが予想される。(C 案) と (C2 案) については、初期軸力は精度良く設定可能であるが、加振時の免震支承の上下変形により軸力変動が生じることが予想される。

積層ゴム支承については、軸力変動がある程度生じても構わないと思われるが、すべり支承については、摩擦力が軸力に依存するため、軸力が小さくなり過ぎないようにする必要がある。

3) 水平 2 方向加力

(A 案) は水平 2 方向加力が可能である。(B 案) は 2 方向用補助支承を使用し、バッファを 2 方向に配置することで技術的には実現可能であるが、中央 1 点で重錘をバランスさせて安定して加振するのは困難と思われる。(C 案) は、水平 2 方向加力は実現出来ない。(C2 案) については、つなぎ梁を 2 本に増やして免震支承と水平反力固定ブロックを側面から挟むように固定する等の工夫をすることで、技術的には実現可能と思われる。

4) 破断実験

(A 案) は破断実験が可能である。(B 案) は震動台の加振性能の制約から、破断実験は実現困難である。(C 案)、(C2 案) については、反力フレームに大がかりな補強が必要になり、破断実験は実現困難と考えられる。

以上より、4 つの実験条件全てを実施可能なのは (A 案) のみである。実験手法と実験条件の関係を整理して、表 1.2.2-1 に示す。

表 1.2.2-1 実験手法の比較

実験手法	A案 上部反力梁 方式	B案 慣性マス 方式	C案 外部水平反力 方式	C2案 外部設置 方式
1) 長時間・大振幅動的 繰り返し加力	○	○	○	○
2) 鉛直載荷	○	△	○	○
3) 水平 2 方向加力	○	△	×	△
4) 破断実験	○	×	×	×

実験手法の選定に関しては、実験条件の実現可能性の他に、以下の事項についても検討する必要がある。

5) 震動台実験設備への負荷

鉛直載荷位置の偏心の影響、破断実験時の衝撃力の影響

6) 実験の手間

実験装置の設置・調整の手間、実験実施の手間

7) 実験の安全性

実験準備から実験実施までの作業安全性、震動台異常モード時の安全性

第IV部第1章における検討では、実験条件全てを実施可能な（A案）を第一候補とし、それらの実験条件がある程度の精度で実現出来る見込みが得られれば、（A案）を進める事で合意した。

2010年10月5日にE-ディフェンスを訪問し、実験条件の実現可能性について議論させて頂いた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 時間・大振幅動的繰り返し加力については、震動台が一度に連続して加振出来るのは累積変形で15m程度である（参考資料 2.5.2 参照）。従って、50m から 100m程度の累積変形を実現するには、3回～6回程度に加振分割して、合間に油を補給して加振する必要がある。ただし、油の補給は、5分程度で完了する。WGとしては長時間加振の条件として容認出来ると判断した。
- 2) 鉛直載荷については、水平方向加振時の震動台鉛直方向の変動変位が、10mm程度生じることが見込まれる（参考資料 2.5.1 の負荷が軽い場合の実測データから推定）。しかし、変動変位の逆位相波を用いた補償加振により3～4mm程度に変動変位が抑制出来る見込みがある。WGとして、面圧変動の目標許容範囲を±20%程度と想定している。鉛直載荷時の反力梁の弾性変形を40mm程度に設定すれば、軸力変動を目標範囲に抑制できる事が期待される。
- 3) 水平 2 方向加力については、問題なく加振が可能である。ただし、加振時間は1～2割短くなる。
- 4) 破断実験については、震動台は変位制御で加振するので、破断時に6000kN程度の急激な荷重変動が生じて、震動台に対して障害が生じることは無いと判断される。反力梁が破断時の衝撃力に対して安全性を確保出来るように設計する必要がある。

上記判断を踏まえ、(A 案)により実験条件を実現することは可能であると判断し、(A 案)を進めることとし、更に 5)～7)の事項をクリアするべく調査・検討を進めた。

5) 震動台実験設備への負荷

- ・鉛直載荷位置の偏心の影響は問題にならないと考えられる。ただし、集中して 10000kN の荷重をかけるので、震動台の構造への影響を確認しておく必要がある。
- ・実験破断時の衝撃力の影響については、4)で述べた通り震動台は水平方向のアクチュエータ容量 (22500kN/5 台) で変位制御加振を行うので、破断時に 6000kN 程度の急激な荷重変動が生じて、加振制御上問題が起きる可能性は低いと判断される。

6) 実験の手間

- ・反力梁を震動台の外部で出来るだけ組み立てた後、震動台上部へ架設することにより、震動台の専有期間を極力短縮することが可能である。一度実験装置を設置すれば他の (B 案)、(C 案)、(C2 案)に比べて実験装置を設置する手間は少なく済む。
- ・実験では、10000kN の鉛直荷重を作用させて、免震支承と反力梁を固定した上で、水平方向に加振する。予め水平方向加振をして鉛直方向変位 (軸力変動を生じる) を実測した上で、鉛直方向変位をキャンセルする補償波 (逆位相波) を作成して、補償加振を行う必要がある。補償加振には手間がかかると考えられるが、一度補償波を作成すればその後の加振は円滑に実施できると考えられる。
- ・10000kN の鉛直荷重を作用させて、免震支承と反力梁を固定する必要がある。PC 鋼棒で両者を固定するにはかなりの手間がかかり、かつ震動台稼動状態で固定するため、安全面でも特別な配慮が必要となる。

7) 実験の安全性

- ・反力梁の架設や、試験体の震動台上への設置、計測器の設置については、全て震動台停止時に行うため、安全に留意して作業を行えば問題はないと考えられる。
- ・特別な配慮が必要なのは、震動台稼動状態で免震支承と反力梁を固定する作業である。この問題は、後述する遠隔固定法を考案することで、人が震動台上へ行かず短時間で固定出来るような工夫をする。
- ・破断実験時には、震動台への影響は問題ないと考えられるが、反力梁は衝撃荷重 (破断時荷重 6000kN に対して 1.5 倍で、9000kN を想定) に対して安全に設計する必要がある。
- ・破断時には、免震部材の破片が周辺に飛散するのを防ぐため、ポリカーボネード等のボードで囲う必要がある。
- ・震動台異常停止には、以下のモードが想定されている。
 - i) レベル B 停止 : 震動台は中立位置に移動する。異常停止時に中立位置に居ない場合は、2 秒後に中立位置に移動する。
 - ii) レベル C 停止 : 着座位置 (中立位置-530mm) に移動する。異常停止時に中立位置に居ない場合は、中立位置まで 2 秒間で戻り、続いて着座位置まで 15 秒間 (133 秒まで変更可能) で戻る。その後、油圧源が順次自動停止。
 - iii) レベル D 停止 : 着座位置までレベル C と同様の動作で戻る。ただし油圧源が即時一斉停止。
 - iv) レベル E 停止 : 緊急遮断弁が閉じて、5 Hz 程度の振動数で 3 方向に 2 G 前後の最大

加速度を保持して震動台が動き（3波程度の継続）、その後加振機から徐々に油圧が抜け、非制御状態で震動台が徐々に落下し、着座装置が受け止める。

震動台異常停止時には、積層ゴム部で破断させることを想定している。天然ゴム系積層ゴムの鉛直方向の破断応力は約 $0.25\sim 0.3 \text{ kN/cm}^2$ と見込まれているので、 $\phi 1000$ 支承の有効断面積を 7850cm^2 とすると破断時の荷重は $1963\text{kN}\sim 2355 \text{ kN}$ 程度と想定される。また、破断時の鉛直歪みは 200% を越える事が想定される。震動台異常停止時には積層ゴム部が破断することで、震動台の動きを阻害する可能性は低いと考えられる。

第2章 多数回繰り返し荷重を受ける実大免震部材の構造実験（その1）

2.1 実験計画

実大免震部材の動的・多数回繰り返し加振実験を実施し、免震部材の特性変化を実測する。ここでは、天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、オイルダンパーを想定する。尚、天然ゴム系積層ゴムについては、第Ⅲ部第1章の縮小試験体の実験結果からも多数回繰り返し荷重による温度上昇や部材特性の変化が少ない事が明らかとなったため、動的加力実験データの重要度が低いことも判明した。そこで、動的・多数回繰り返し加振実験では弾性すべり支承の実験を集中して実施することとし、天然ゴム系積層ゴムについては静的加力実験を実施することとした。

2.1.1 試験体

① 天然ゴム系積層ゴム

φ1000 の試験体を参考資料 2.5.5 に示す。

② 弾性すべり支承（高摩擦）

φ800 の試験体を参考資料 2.5.5 に示す。

③ オイルダンパー

1000kN タイプ試験体（BM250-4C）の図面を参考資料 2.5.5 に示す。

2.1.2 加力治具と試験体設置

(1) 試験体下部ブロックの設置

① 震動台上に試験体下部ブロックを設置（図 2.1-1）。

留意事項：

- ・ 支承に作用する鉛直軸力を分散させて震動台テーブルへ伝えるため、試験体下部ブロックから震動台へ伝わる荷重が、 1000kN/m^2 以下になるように下部ブロックの大きさを設定した。
- ・ 下部ブロック上に、荷重を計測するロードセル架台を介して、積層ゴム支承或いは弾性すべり支承を設置する。
- ・ 固定には M48 ボルト（S45C）を使用し、1 箇所あたり 450kN 程度の締付け力を導入し、加振時にブロックに滑りが生じないようにする。

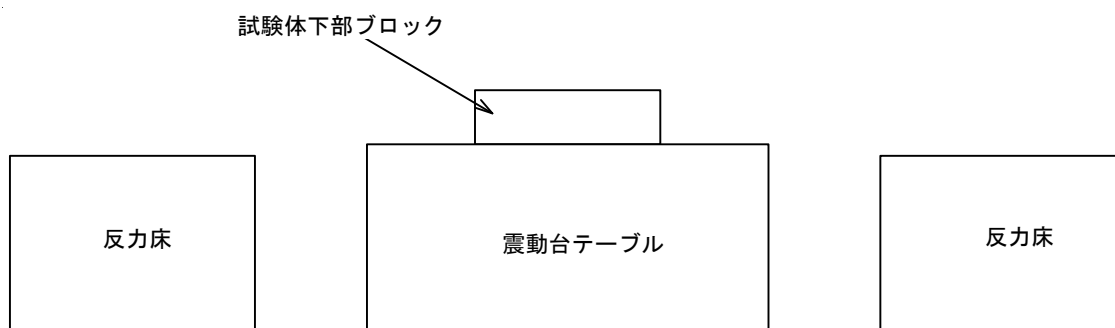


図 2.1-1 試験体下部ブロックの設置

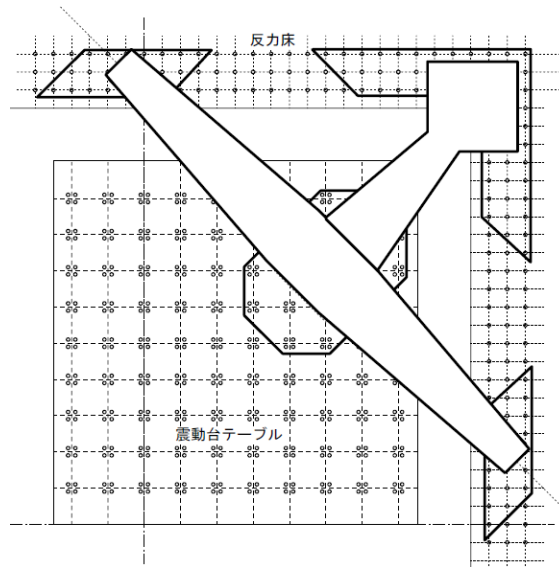
(2) 反力梁の設置

② 主梁と受け梁を架設。

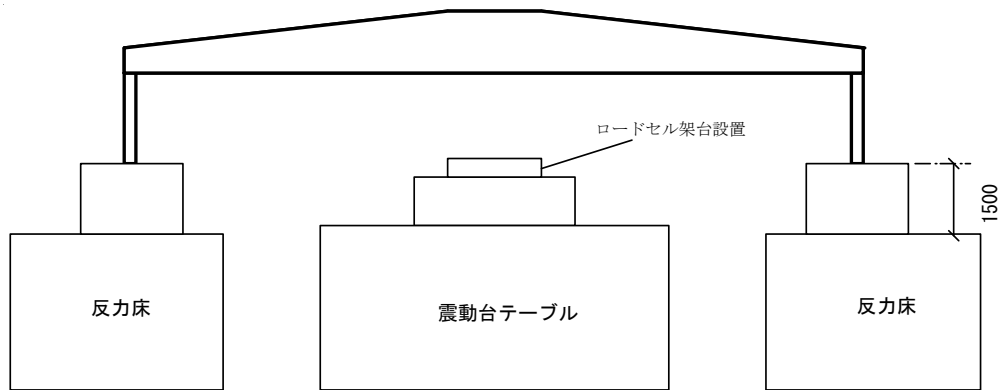
- ・ 主梁と受け梁は固定用ブロックで反力床上に設置する（図 2.1-2）。

留意事項：固定には M48 ボルト（S45C）を使用し、1 箇所あたり 450kN 程度の締付け力を導入し、多数繰り返し加振時にブロックに滑りが生じないようにする。

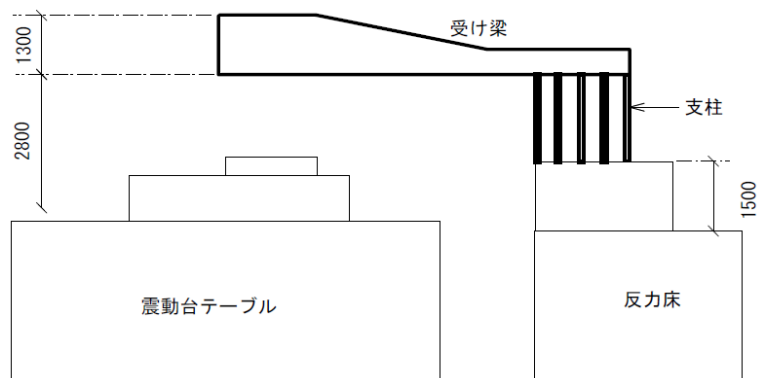
- ・ 試験体下部ブロック上にロードセル架台を設置する。



(a)反力梁平面図



(b)反力梁（主梁方向）



(c)反力梁（受け梁方向）

図 2.1-2 反力梁の設置

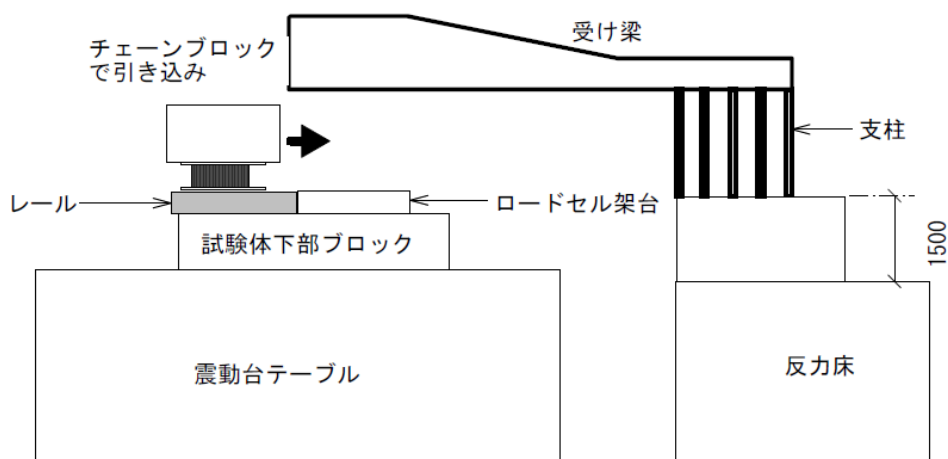
(3) 試験体の設置

③ 試験体下部ブロック上に支承を設置。

支承は予め試験体上部ブロックと固定しておき、クレーンで吊って試験体下部ブロック上へ降ろす。その後、チェンブロックで反力梁下の所定の位置へ引き込み、試験体下部ブロックのロードセル架台上に固定する（図 2.1-3）。

留意事項：

- ・ 支承は震動台コーナー部の 3m×2.5m の位置に中心が来るように設置する。



(a) 試験体の引き込み

図 2.1-3 試験体下部ブロック上への支承設置

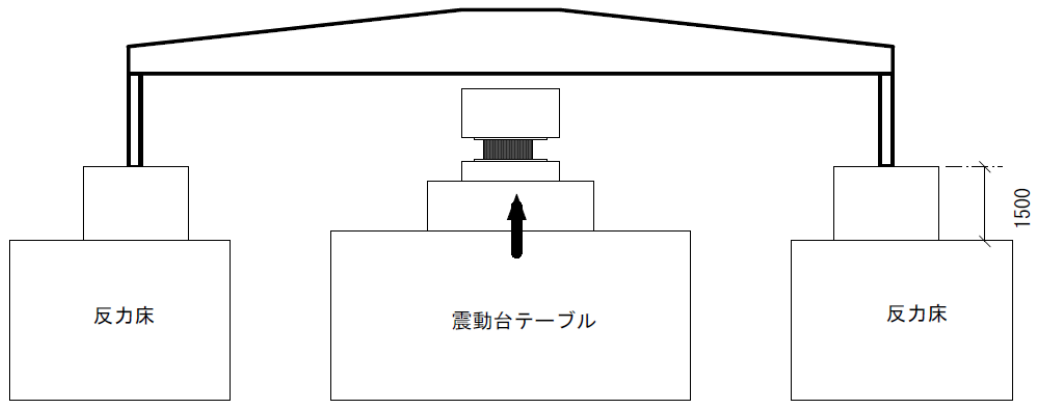
2.1.3 加力計画

① 震動台を起動し、ならし運転を行う。

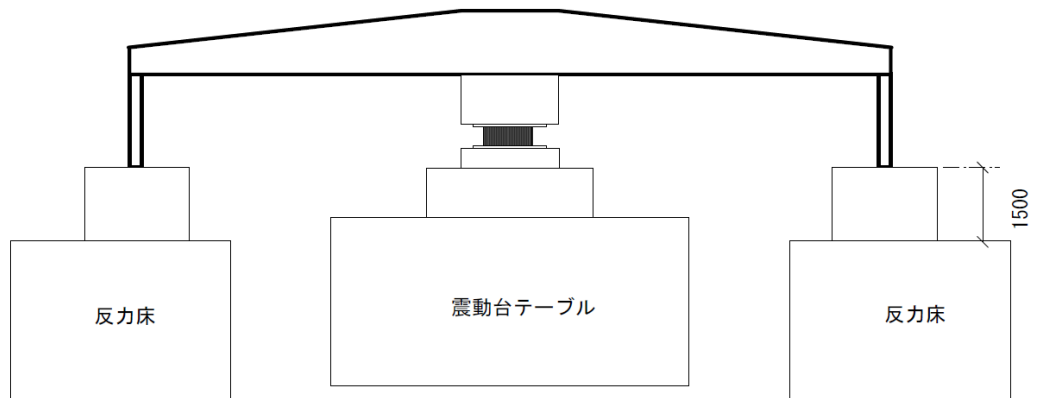
- ・ 試験体上部ブロックと主梁が接触しないように、ならしの変位量とオフセット位置を設定する。震動台は、通常の運用では着座状態から一旦 540mm 上昇させて中立軸位置へセットする必要がある。本実験の加振は、震動台のこの運用に対応するため、オイルダンパー加振時にはロードセル架台を撤去して、加振高さを調整することとした。

② 震動台をマニュアルで微調整しながら試験体上部ブロックと主梁を密着させる。

- ・ 震動台を所定の平面位置へ移動後、試験体上部ブロックと主梁が接触する直前位置まで上昇させる（図 2.1-4）。次に、微調整により試験体上部ブロックと主梁下部が密着するまで上昇させる。
- ・ 試験体上部ブロックと主梁下部にはコッターを予め溶接しておき、コッター部で密着させる（図 2.1-5(b)）。震動台の平面位置をコッターに対して 2mm 程度以内に納めることを目標とする。
- ・ 試験体上部ブロックと主梁下部がコッターで密着した時点で、押し引き両用の油圧ジャッキにより固定金具を締付けて固定する（図 2.1-5(c)）。加力荷重が大きい受け梁方向から固定金具で固定する（図 2.1-6）。（参考資料 2.5.6）
- ・ 震動台に過大な傾斜角が生じないように留意する。

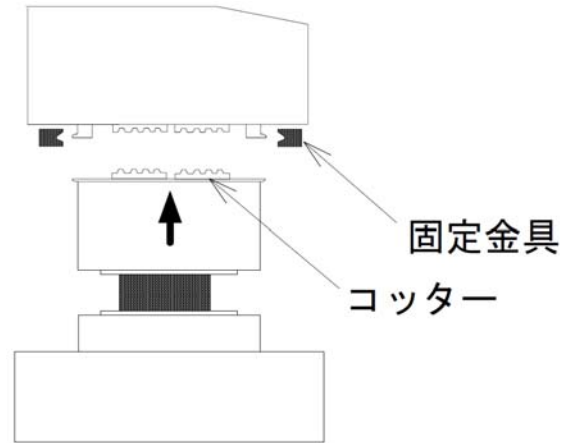


(a) 震動台中立位置

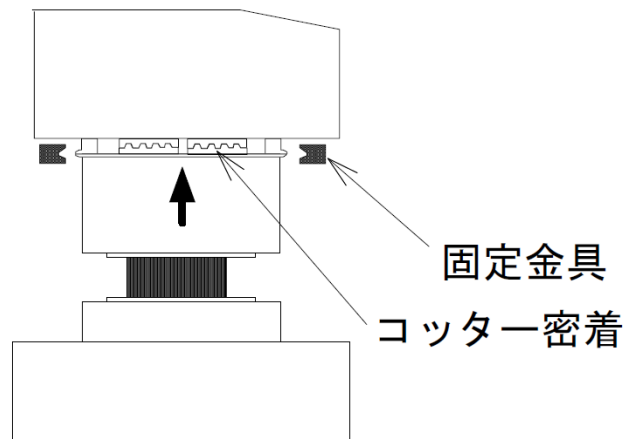


(b) 震動台上昇，コッター部密着

図 2.1-4 震動台の変位制御（試験体下部ブロックと主梁を密着させる）



(a) コッターと固定金具



(b) 震動台上昇とコッター密着

図 2.1-5 試験体下部ブロックと主梁の密着

③ 震動台を上昇させて支承に所定の鉛直軸力を導入する。

留意事項：

- ・ 反力梁の主梁は、5000kN の鉛直軸力を導入した時点で 1/350 程度の傾きが生じることが予測される。このため、震動台を上昇させながら傾斜させるように制御して、固定金具とコッターの密着を保持する。
- ・ 10000kN の鉛直荷重に対して 1.5 倍の安全率を考慮して、主梁は 15000kN 作用時程度まで降伏しないように設計している。ただし、震動台の加振性能としてはこれ以上の荷重が作用する可能性があるため、安全監視レベルを軸力導入前の位置から 50mm 程度以下に設定しておくこととする。

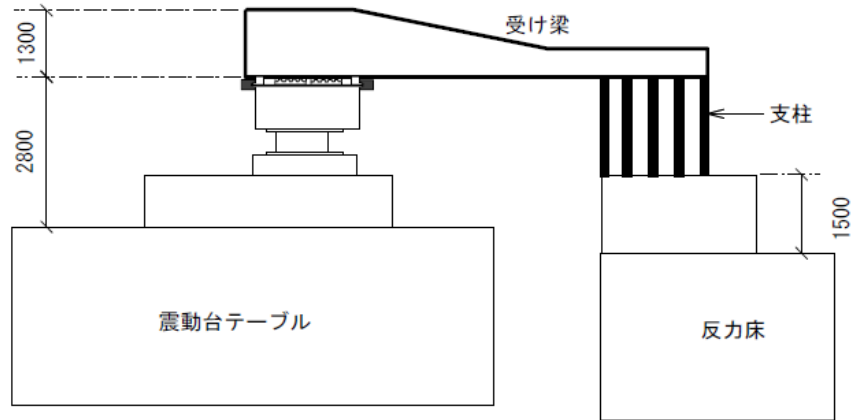


図 2.1-6 固定金具による固定（油圧ジャッキによる遠隔操作）

- ・ 各試験体が実験できるように加力時の震動台高さを設定する。ダンパーも積層ゴムと同じ固定金具を用いて固定し、加力する。（参考資料 2.5.6）
- ・ 固定金具や反力梁の損傷を防ぐため、震動台変位の安全監視レベルを適切に設定することとする。
- ・ 震動台異常停止時には、固定金具を開放することを原則とする。震動台から固定金具の油圧ジャッキの操作盤に信号を送って、弁を開放する。同時に手動によりジャッキの開放動作を開始する。弾性すべり支承の場合は、弾性すべり支承とすべり板の間で縁が切れているため、固定金具の開放は行わないこととする。
- ④ 弾性すべり支承に所定の鉛直軸力を導入した状態で、水平方向に加振する。
 - ・ 水平方向加振時の震動台の鉛直方向変位を調べるため、無負荷状態、2000kN、5000kN、と必要なステップを踏んで鉛直荷重を増やした場合の影響を最初に調べる。
 - ・ 主梁方向の水平1方向正弦波加振を優先する。
 - ・ 2方向加振は、円軌道で設定する。
 - ・ 長周期地震動模擬波による免震建築物応答波についても加振を行う。
- ⑤ 試験体入替え作業
 - ・ 主梁と試験体上部ブロックの固定金具を取外す（遠隔操作）。
 - ・ 震動台を徐々に下降させて停止させる。
 - ・ 試験体とロードセル架台の固定を解除し、試験体をチェーンブロックにより下部試験体ブロック上を引張り移動させて、クレーンにより撤去する。

2.1.4 安全上の留意点整理

表 2.1-1 に安全に関わる事項のまとめを示す。

表 2.1-1 に安全に関わる事項のまとめ

作業手順	作業内容	留意点	対応
(1) 試験体下部ブロックの設置	① 震動台上への試験体下部ブロック設置	<ul style="list-style-type: none"> 震動台テーブルへの過大な集中荷重。 試験体の滑り。 	<ul style="list-style-type: none"> 試験体下部ブロックと締付けボルト本数を適切に設定。 加力時に滑りが生じないようにボルト締付け力と本数を設定。
(2) 反力梁の設置	② 主梁と受け梁の架設	<ul style="list-style-type: none"> 加振時の滑り。 	<ul style="list-style-type: none"> 加振時に滑りが生じないようにボルト締付け力と本数を設定。 鉛直軸力10000kN導入時に、反力梁の柱が若干滑る可能性あり。
(3) 試験体の設置	③ 試験体下部ブロック上に支承を設置	<ul style="list-style-type: none"> 震動台コーナー部の上下加力性能。 	<ul style="list-style-type: none"> 支承は震動台コーナー部の3m×2.5mの位置に中心が来るように設置。
(4) 加振準備 (震動台起動)	④ 震動台の起動時ならし運転	<ul style="list-style-type: none"> 反力との接触。 	<ul style="list-style-type: none"> ならしの変位量と中立点を適切に設定 (上下は着座位置から最低30mm以上)。
	⑤ 震動台を変位制御して、試験体上部ブロックと主梁を密着	<ul style="list-style-type: none"> 震動台上昇時の異常。 	<ul style="list-style-type: none"> 震動台変位の安全監視レベルを水平方向は試験体上部ブロックと固定金具が接触しない範囲に設定。上下方向は、試験体上部ブロックが主梁に密着後、60mm程度になるよう設定。(10000kN作用時に40mm程度変形するように主梁を設計) 10000kNの鉛直荷重に対して、主梁は15000kN作用時程度まで降伏しないように設計する。 震動台に過大な傾斜角が生じないように留意。
	⑥ 震動台を上昇させて支承に所定の鉛直軸力を導入。	<ul style="list-style-type: none"> 震動台の異常。 	<ul style="list-style-type: none"> コッター部が外れて震動台が下降。
	⑦ 主梁と試験体上部ブロックの固定 (遠隔作業)	<ul style="list-style-type: none"> 震動台の異常。 アクチュエータの油漏れ。 	<ul style="list-style-type: none"> 油圧ジャッキにより固定金具を遠隔固定。(震動台に異常が発生して下降した際は、積層ゴム部分で引張り破断させる。積層ゴムの引張り破断荷重は2355kN程度と想定される) 水平方向の油圧アクチュエータが設置されていない側に試験体を設置。
(5) 震動台加振	⑨ 震動台による水平加振	<ul style="list-style-type: none"> 繰返し加振時の震動台異常モード 繰返し加振時の上下変位変動 	<ul style="list-style-type: none"> 水平2方向動的加振振幅は、X、Y各方向±40cm (せん断歪で200%) 程度以下に設定。 震動台変位の安全監視レベルを適切に設定。 予備加振を行い、水平加振に伴う上下方向変位の変動を測定し、必要に応じて上下方向変位の変動をキャンセルするための補償波加振を行う。
		<ul style="list-style-type: none"> 破断試験時の試験体破断 	<ul style="list-style-type: none"> 破断時の震動台への作用力を評価しておく。 水平方向の安全監視レベルを通常加振時用に設定し、受け梁方向 (主梁と直交方向) に±90cm程度の漸増加振を行う。 試験体の破片が周囲に飛散するのを防ぐため、防護パネルを試験体周囲に設置。
(6) 試験体入替え作業	⑩ 主梁と試験体上部ブロックの固定金具解除 (遠隔作業)	<ul style="list-style-type: none"> 固定金具が外れない 	<ul style="list-style-type: none"> 押し引き両用ジャッキを使用する。 万一に備えて、震動台外から金具を引張れるような手段 (チェーンブロック等) も検討する。
	⑪ 震動台を徐々に下降させて停止		
	⑫ 試験体とロードセル架台の固定を解除。クレーンにより撤去		

2.1.5 計測計画

試験体、加力治具、震動台について、変位、加速度、荷重、歪み、温度のデータを計測する。E-ディフェンスの収録システムと、一部のデータについては、別システムのシステムで収録する（合計 286ch.）。別システムのシステムでは計測データのリアルタイムのモニタリングを行い、加力準備時の震動台変位制御の判断に使用し、加振中の試験体応答が把握出来るように配慮する。図 2.1-7 にデータ収録システム図を示す（参考資料 2.5.7）。

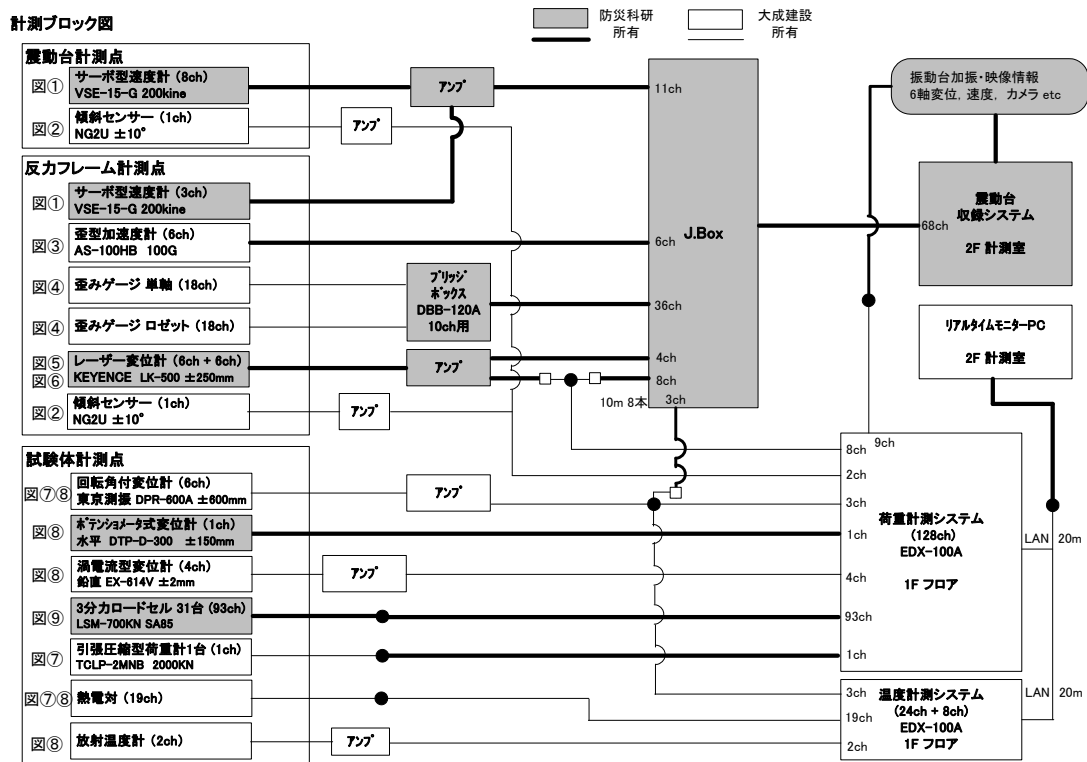


図 2.1-7 震動台収録システム系統図

2.1.6 防護計画

試験体の破断に備えて、計測と固定金具用の油圧ジャッキ制御を行う場所と震動台間をポリカーボネード製の防護壁で遮る計画とする。

2.1.7 実験方法

軸力変動を出来るだけ小さくするため、震動台水平加力時の上下変位をキャンセルするように加振波を作成する。実際には、無負荷時に震動台を水平方向に加振し、その時に生じた震動台上下変位を計測し、計測変位波形を逆位相で作用させるようにして補償波を作成した。

震動台の加振波は、震動台中央上面位置の運動で定義されている。加振波は、支承中心位置における(震動台コーナー部の3m×2.5mの位置に中心が来るように設置)運動で定義する。従って、支承に対する加振波を作成し、震動台を剛体と仮定して支承中心位置の加振波を震動台中央事情面位置における加振波へ座標変換する。座標変換の基礎式を参考資料 2.5.8 に、補償波の作成例を参考資料 2.5.9 に示す。

1) 弾性すべり支承 (高摩擦)

試験項目は基本特性試験および多数回繰り返し加振試験 (長周期 3A)、地震応答波加振試験の3項目である。基本特性試験では、出荷検査と同等の条件で、試験前の「前基本特性」、多数回繰り返し直後の「直後基本特性」、冷却後の「後基本特性」を実施する。

多数回繰り返し加振試験は、正弦波 (周期 4 秒) の連続加振とすることが目標であるが、予め無負荷状態で確認された震動台の連続加振能力の制約 (振幅±40cm の場合で 5 サイクル) から、正弦波 5 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル (所用時間約 2 分) を設ける。すなわち、長周期 3A (累積変形 50m) 条件では、5 サイクル×7 セットの加振を実施する。

支承は、高温用断熱板 (t = 10mm, 日本 D.M.E 製) を介して、加力治具の試験体固定ブロックに取り付ける。

表 2.1-2 に試験条件の詳細と試験ケースを示す。

2) オイルダンパー

試験項目は基本特性試験および多数回繰り返し加振試験 (長周期 3A)、大速度試験の3項目である。基本特性試験では、出荷検査と同等の条件で、試験前の「前基本特性」、多数回繰り返し直後の「直後基本特性」、冷却後の「後基本特性」を実施する。

多数回繰り返し加振試験は、正弦波 (周期 4 秒) の連続加振とすることが目標であるが、予め無負荷状態で確認された震動台の連続加振能力の制約 (振幅±40cm の場合で 5 サイクル) から、正弦波 5 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル (所用時間約 2 分) を設ける。すなわち、長周期 3A (累積変形 50m) 条件では、4 サイクル×8 セットの加振を実施する。

ダンパーは、高温用断熱板 (t = 10mm, 日本 D.M.E 製) を介して、加力治具の試験体固定ブロックに取り付ける。

表 2.1-3 に試験条件の詳細と試験ケースを示す。

表 2.1-2 試験条件と試験ケース：弾性すべり支承（高摩擦）

実施日	ケース	試験条件	面圧 (N/mm ²)	周期 (s)	変位 (mm)	サイクル (回)	インターバル (回)	累積変形 (m)	備考（加振波名称）
1月31日		(前)基本特性	10	4	u:100	4	-	1.6	初期基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答（1方向）－1		-	u:110	-	-	13.0	U1-E-aic003L
		地震応答（1方向）－2			u:191			13.2	U1-E-szo024L
	3A	長周期（1方向）		4	u: 400	35(5×7)	6	56.0	U1-SL5Z
		(直後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
		冷却							
2月1日		(前)基本特性	10	4	u: 100	4	-	1.6	冷却後基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答（2方向）		-	u [EW]: 102 v [NS]: 85	-	-	1.7	UV1-E-aiL
	3A'	長周期（2方向）－1		4	u:255 v: 255	35(5×7)	6	56.0	UV1-SL5M $\pi/2$ 位相差（円軌道）
	3A'	長周期（2方向）－2		4	u:255 v: 255	35(5×7)	6	56.0	UV1-SL5M $\pi/2$ 位相差（円軌道）
		(直後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
		(後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	U1-SL4Z

表 2.1-3 試験条件と試験ケース：オイルダンパー

	ケース	試験項目	周期 (s)	変位 (mm)	速度 (cm/s)	サイクル (回)	インターバル (回)	累積変形 (m)	備考
2月6日		(前)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	初期基本特性の確認 V0-SL2
	3A	長周期 (1方向) - 1	4	400	62.8	32(4×8) *2	7	51.2*2	V0-SL4M
	3A	長周期 (1方向) - 2	4	400	62.8	32(4×8) *2	7	51.2*2	V0-SL4M
		(直後)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	繰返し直後の基本特性の確認 V0-SL2
		冷却							
2月7日		(前)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	冷却後基本特性の確認 V0-SL2
		地震応答 (1方向) - 1		u:110	-		-	13.0	U1-E-aic003L
		地震応答 (1方向) - 2		u:191			-	13.2	U1-E-szo024L
	4	大速度試験 - 1	2.5	300	75	2	-	1.2	V0-SR2M (50.0%)
	4	大速度試験 - 2	2.5	400	100	2	-	1.6	V0-SR2M (66.6%)
	4	大速度試験 - 3	2.5	500	125	2	-	2.0	V0-SR2M (83.3%)
	4	大速度試験 - 4	2.5	600	150	2	-	2.4	V0-SR2M (100.0%)
		(直後)基本特性	4	159	25	2	-	1.3	大速度直後の基本特性の確認 V0-SL2

*1 $\Delta t=0.01s$ (他ケースは全て 0.02s)、*2 オイルダンパーについては、油温が 100℃を超えた (限界状態に達した) 場合、加振を終了する

2.1.8 実験スケジュール

表 2.1-4 に E-ディフェンスでの実験スケジュールを示す。

2.2 実験手法の検証

2.2.1 免震部材への鉛直軸力導入

本実験では、各ロードセルに加わる荷重が許容荷重（700kN）を越えないようにするため、ロードセル取付時の初期荷重分布を静歪として計測しておき、加力時の軸力とせん断力は動歪として計測した。加力時にロードセルに加わる荷重が許容値を越えていないことの確認は、静歪と動歪の和から評価した。

(1)初期荷重分布の計測

以下の手順でロードセルを取付けて、静歪を計測した。

- ① ロードセルを下部ブロックに締付け
- ② 静歪の計測
- ③ 感圧紙をロードセル上に設置。
- ④ 上部ブロックの設置と静歪の計測。感圧紙の色変化確認。
- ⑤ トレッシングペーパー（0.02mm）設置による荷重分担の調整。
- ⑥ 上部ブロックの締付けと静歪の計測

初期軸力の計測結果を図 2.2-1 に示す。ロードセルに 700kN の鉛直載荷をした時の変形はメーカー規格によれば 0.05mm であり、0.02mm のトレッシングペーパーを置くことでロードセルの荷重分布が、実際に変化することを確認した。上部ブロックを締付ける前に出来るだけロードセルの静歪分布にばらつきが生じないように調整したが、上部ブロックを締付けると上部ブロックの 220mm 鋼板の弾性変形によりロードセルの荷重分布にばらつきが生じた。

図 2.1.1 に示す通り、圧縮最大荷重は No.17 のロードセルで 204kN、引張最大荷重は No.15 のロードセルで 142kN となった。

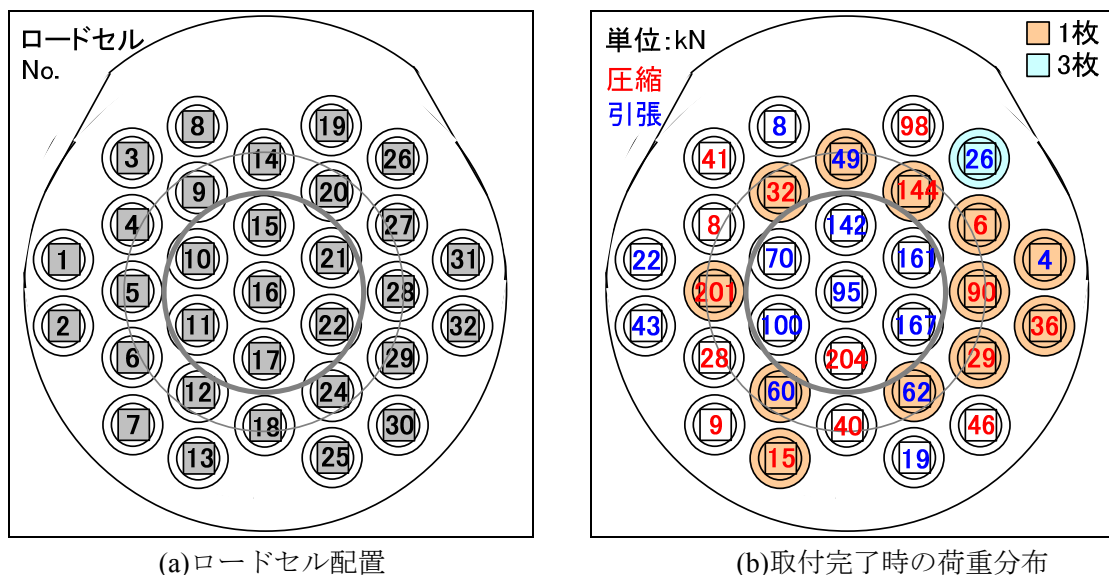


図 2.2-1 初期軸力の計測結果

(2)軸力導入時と水平加力時の計測

以下の手順で軸力を導入して、水平加力を行った。軸力導入前にロードセルのバランスを取り、以後の軸力とせん断力を動歪として計測した。

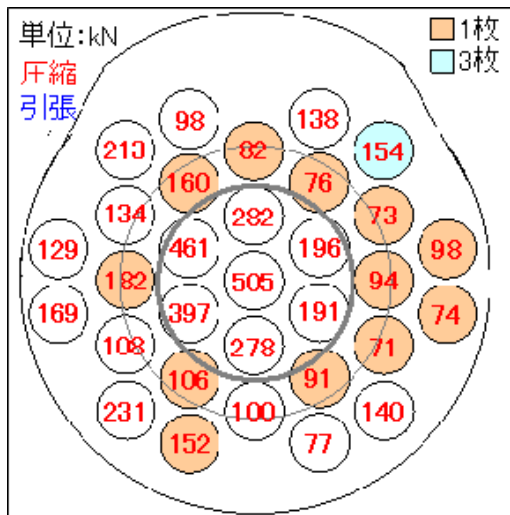
- ① 震動台着座状態から中立軸位置 (+540mm) へ上昇
- ② 震動台降下 (+350mm)、ならし加振 (水平±500mm、上下 50mm)
- ③ 中立軸位置へ上昇。以後、ここを原点 (0、0、0) として震動台変位を制御。
- ④ 震動台水平位置の修正 (X : 35mm、Y : 22mm)
- ⑤ コッター噛合い位置まで上昇
- ⑥ コッター密着レベルまで小刻みに上昇
- ⑦ コッター密着をロードセル荷重変化で確認。ジャッキで遠隔固定。
- ⑧ 水平加力

震動台を上昇させて免震部材に所定の軸力が入っている事と、ロードセルの許容荷重を越えていない事を、図 2.1-7 に示したリアルタイムモニターで載荷中のロードセル荷重をモニターした。リアルタイムモニターによる確認状況の例を写真 2.2-1 に示す。

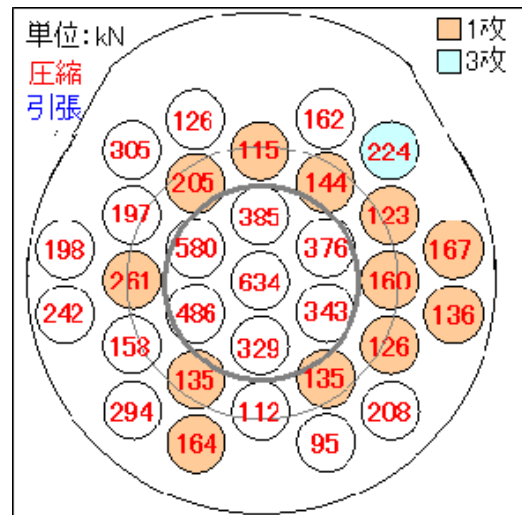


写真 2.2-1 5000kN 軸力導入時のリアルタイムモニター確認状況

5000kN 軸力導入時と主梁方向水平加力時 (±400mm) のロードセルの荷重分布を図 2.2-2 に示す。中央部の No.16 のロードセルに最も大きな荷重が作用している。No.17 のロードセルの荷重が先行して増大することが懸念されたが、対称な位置にある No.17 と No.15 のロードセル荷重はほぼ同じ大きさで増加している。ロードセルを上部ブロックにしっかりと締付けて固定すると、場所により圧縮と引張が発生したが、ロードセルが一様に荷重分担していると考えて載荷時の荷重増分を考えることが出来るようである。



(c)5000kN 軸力導入時の荷重分布



(d)水平加力時の最大荷重

図 2.2-2 5000kN 軸力導入時と主梁方向水平加力時 ($\pm 400\text{mm}$) のロードセルの荷重分布

(3)軸力解放の手順は以下の通りである。

- ① ロードセル荷重が解放されるコッター密着レベルまで震動台を降下。
- ② ジャッキ解放。
- ③ 震動台を中立位置へ降下。
- ④ 着座状態へ。震動台停止。

2.2.2 加力波形と加力精度

2.2.2.1 加力波形の作成

2.1.7でも触れた通り、震動台は震動台上面中央位置の6自由度変位 (x 、 y 、 z 、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z) で制御される。一方、試験体の加力は、震動台コーナー部から3.5m×2mの設置位置において実施される。そこで、試験体への加力波形を試験体設置位置において作成し、震動台を剛体とみなした座標変換により震動台上面中央位置における加力波形を作成して震動台の目標加力波形とした。

震動台を上昇させて免震部材に軸力を導入すると、受梁方向に傾斜するため、震動台を傾斜させて免震部材に加わる面圧を均一化する必要がある。主梁方向に加力する場合は、震動台の鉛直位置を保った状態で傾斜角と直交方向に加力を行えば良いが、受梁方向に加力する場合は傾斜面に沿って震動台変位を制御する必要がある。

加力波形の作成にあたっては、先ず無負荷時に目標加力波形を用いた加振を行い、目標加力波形に対する震動台応答波形の誤差を評価して、誤差が小さくなるように補償波を作成した。補償波の作成方法としては、目標波形と応答波形の逆伝達関数を用いる震動台の入力補償機能を利用する方法と、誤差波形の逆位相波を用いて誤差のキャンセルを試みる方法と、2種類の方法を試した。逆位相波形を用いる方法が簡便かつ有効であることが判明したので、この方法を採用することにした。

水平方向の加振波形については、目標加力波形と応答波形には殆ど誤差が見られなかったため、上下方向加力波形について逆位相波による補償を行った。

2.2.2.2 加力波形の精度

図2.2-3に周期4秒で試験体位置での主梁方向振幅が $\pm 400\text{mm}$ の正弦波を目標波形とした場合について、無負荷時の震動台応答波形(0MN 補償無)と、上下方向逆位相波による補償時震動台応答波形(0MN 補償有)、及び無負荷時に作成した補償波による5MN軸力導入時の震動台応答波形(5MN 補償有)を目標波形と比較して示す。

水平方向については、目標波形と応答波形は最初に若干の時間ずれが見られるがほぼ一致している。上下方向については、無負荷時に水平方向加振周期の1/2の周期の誤差成分が見られる。誤差振幅は最大で2.2mm程度である。逆位相波による補償時の震動台応答波形では、初期の誤差振幅は1.4mm程度に、それ以後の誤差振幅は0.5mm程度に抑制されており逆位相波による補償が有効であることがわかる。更に、無負荷時に作成した補償波形を用いて5MN軸力導入時に加力を行ったが、上下方向の誤差振幅は無負荷時とほぼ同等であった。無負荷時に補償波形を作成して、軸力導入時に用いる方法が有効であることがわかる。

図2.2-4に試験体位置における震動台上下変位とそれに伴うフレーム変位と軸力変動を示す。5000kNの軸力に対して加力初期に500kN程度の変動が見られるが、それ以後は200kN程度以内の軸力変動に収まっており、精度の高い加振が実現出来ている。

図2.2-5に試験体位置における、震動台の主梁方向加力変位と、フレーム変位及びU方向のせん断荷重を示す。フレーム変形も小さく、目標通り主梁方向に $\pm 400\text{mm}$ の加力が実現出来ている。

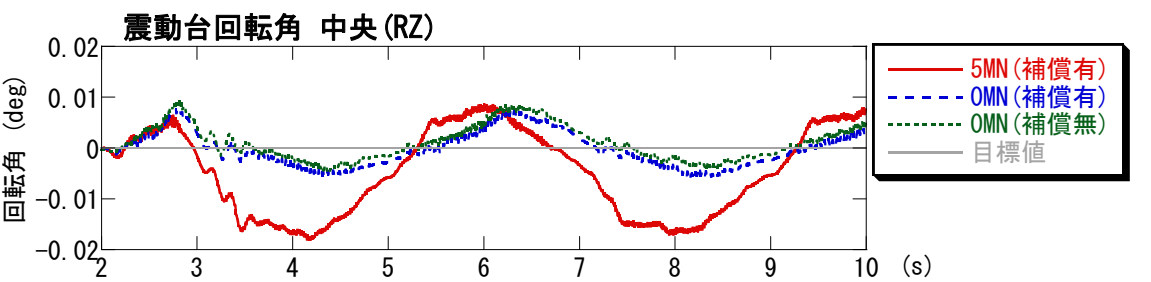
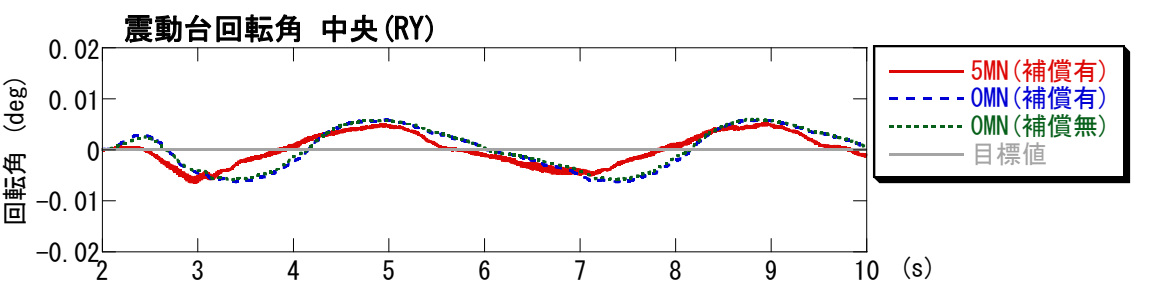
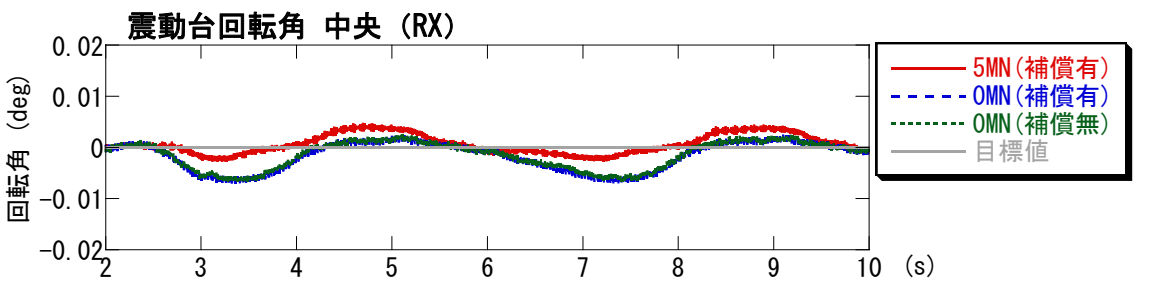
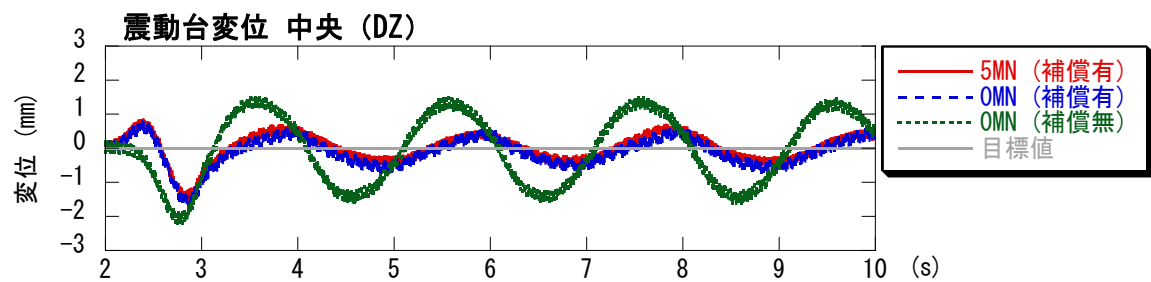
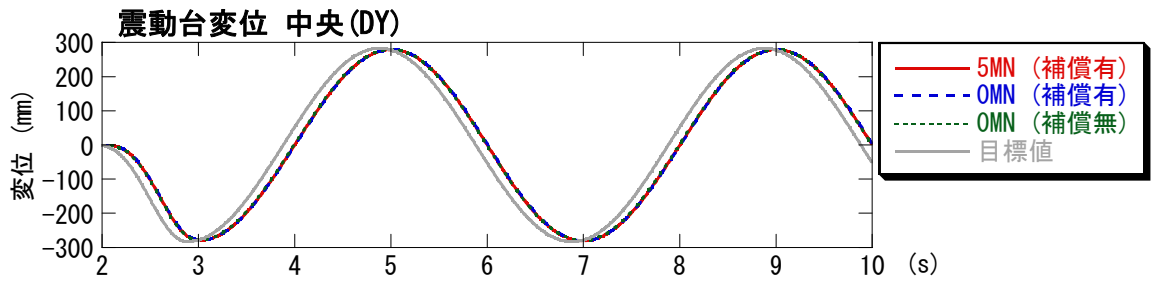
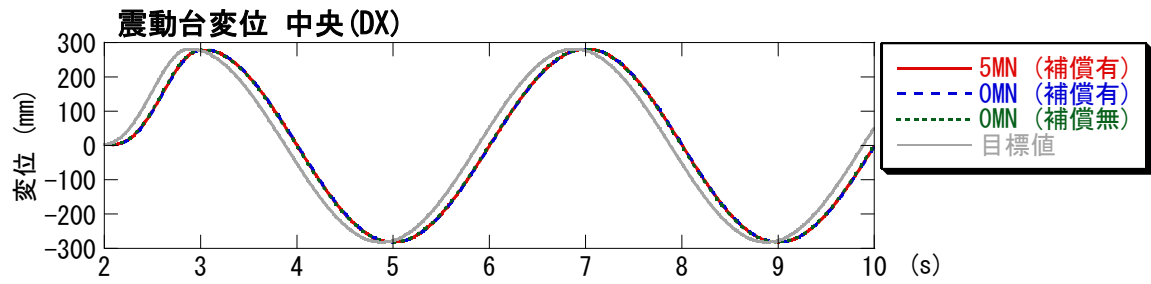


図 2.2-3 震動台応答波の比較 (震動台中央位置)

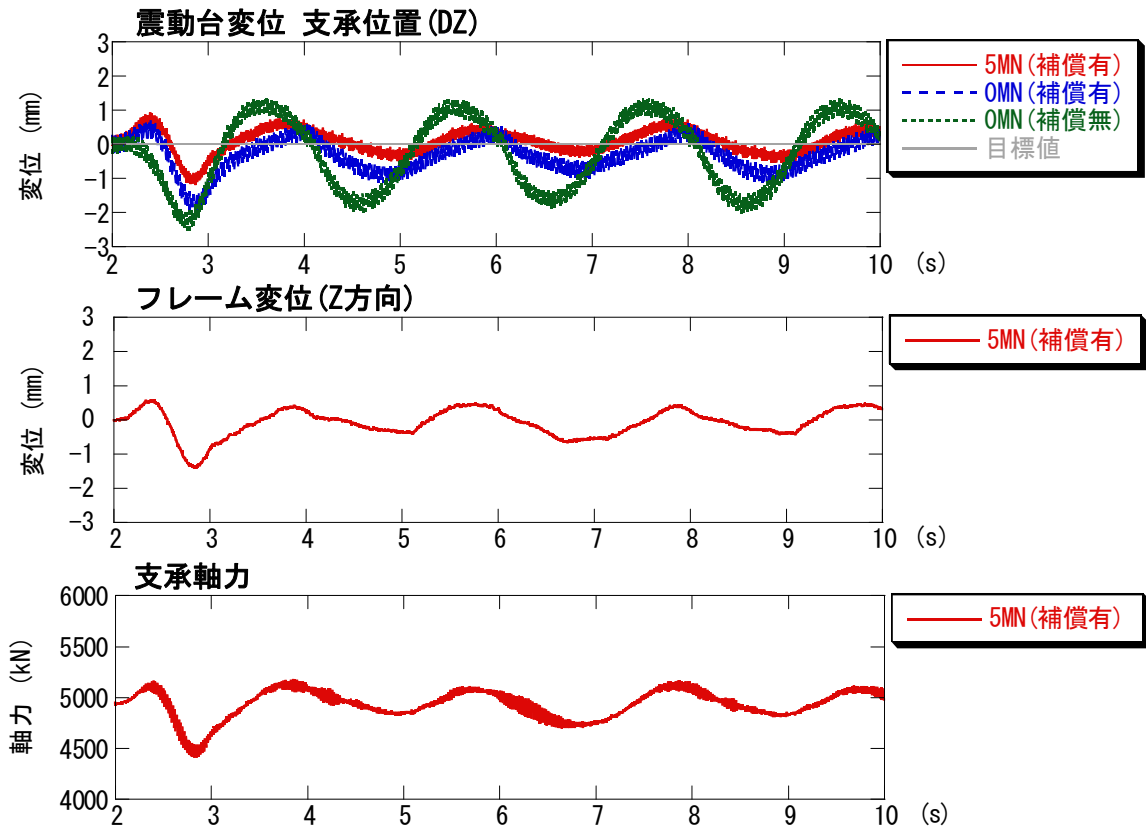


図 2.2-4 支承設置位置の波形比較 (Z 方向)

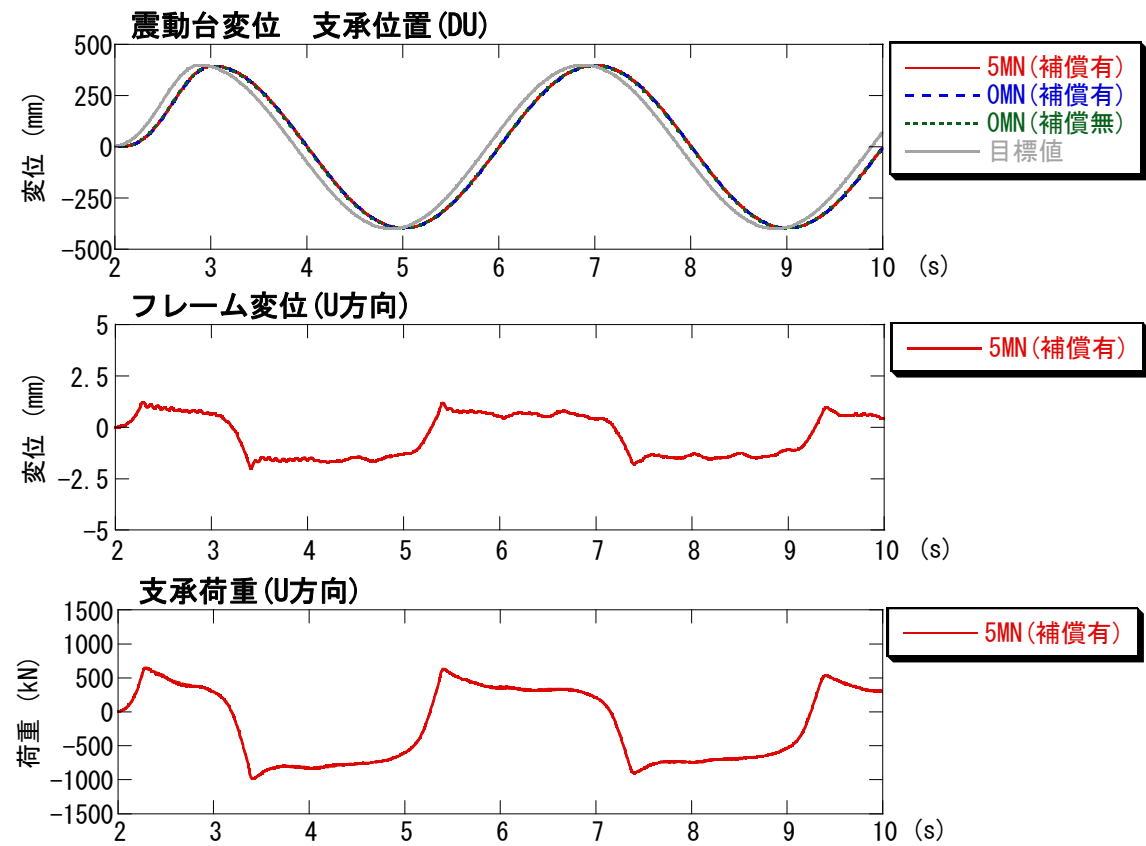


図 2.2-5 支承位置の波形比較 (U 方向)

2.2.3 加力治具の性能

加力実験時の震動台傾斜角と、反力フレームの変形・傾斜角、及び主梁脚部固定ブロックの変位をまとめて、軸力導入時の結果を表 2.2-1 に、水平加力時の結果を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-1 に示す通り、5MN 軸力導入時の主梁フレームの上下変形は 17.4mm、受梁方向（主梁 U 軸回り）の傾斜角は 1/588 であった。この時に、震動台の U 軸回りの傾斜を 1/769 に制御して支承面圧の均一化を行った。受梁軸回りには殆ど回転していない。主梁脚部固定ブロックは、片側ブロックが最大で 5.4mm 程度変位した。これは、固定ブロックを反力床に固定する際に、反力床の固定ボルト用穴位置が一部ずれていたためにボルト固定が出来ず固定度が低かったためと思われる。

表 2.2-2 には、弾性すべり支承の主梁（U）方向の長周期繰り返し加振、同じく 2 方向（UV）長周期繰り返し加振、オイルダンパーの長周期繰り返し加振時の結果を示している。変動成分は小さく、反力フレームとして十分な性能を発揮していることがわかる。

参考資料 2.5.10 に、実験時の反力フレーム各部に取付けた歪ゲージ(参考資料 2.5.7 参照)から、応力を評価した結果を示す。主梁方向の長周期繰り返し加振時に主梁端部で最大の応力が発生しているが、長期許容応力に対する比率は 0.73 であり、反力フレームは十分な性能を有していることがわかる。

表 2.2-1 軸力導入時の加力治具変形

载荷ケース	フレーム			柱ブロック		震動台	
	Z方向変位 (mm)	U軸廻り傾斜	V軸廻り傾斜	Block1 U方向変位 (mm)	Block2 U方向変位 (mm)	U軸廻り傾斜	V軸廻り傾斜
1MN鉛直载荷	3.1	1/2491	1/10409	0.1	0.0	1/205541	1/398486
2MN鉛直载荷	6.4	1/1426	1/6639	0.6	0.1	1/62598	1/793273
3MN鉛直载荷	9.9	1/1085	1/7149	2.6	0.1	1/476554	1/353082
4MN鉛直载荷	14.4	1/714	1/4900	4.9	0.1	1/3121	1/264964
5MN鉛直载荷	17.4	1/588	1/3504	5.4	0.2	1/769	1/242412

表 2.2-2 水平加力時の加力治具変形（変動成分）

加振ケース	フレーム					ブロック			
	Z方向変位 (mm)	U方向変位 (mm)	V方向変位 (mm)	U軸まわり傾き	V軸まわり傾き	1-U方向変位 (mm)	2-U方向変位 (mm)	3-X方向変位 (mm)	3-Y方向変位 (mm)
5MN鉛直载荷+長周期繰り返し加振 (U方向1MN)	0.8	1.2	0.3	1/7524	1/3773	0.1	0.1	0.0	0.0
5MN鉛直载荷+長周期繰り返し加振 (UV方向0.75MN)	0.6	1.3	0.8	1/3075	1/5574	0.1	0.1	0.1	0.1
オイル長周期繰り返し加振 (V方向1MN)	0.4	0.1	0.9	1/3690	1/7662	0.0	0.0	0.0	0.2

2.3 実験結果

2.3.1 弾性すべり支承（高摩擦）

(1) はじめに

第Ⅲ部 1.3.4 において実施した、弾性すべり支承（高摩擦）の縮小試験体（Φ300）による長振幅高速繰り返し試験では、累積変形 100m までの多数回繰り返しに対する载荷試験を通じて、繰り返しによる摩擦特性の低下傾向やインターバル時の摩擦係数の復帰傾向がみられること、摩擦による発熱ですべり面を中心に温度が 280℃程度まで上昇することが確認された。

本章では、すべりに伴う発熱・放熱環境や累積エネルギーの上昇速度をより現実に近い状態で再現し、摩擦特性の変化や温度上昇、スケール効果を把握することを目的として、E-ディフェンスの大型震動台を用いて実大試験体（Φ800）の長振幅高速繰り返し試験を実施した結果を示す。

試験で確認する項目は以下の通りである。

- ① 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化
- ② 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化
- ③ 多数回繰り返しに対する耐久性能

試験日時：

2012 年 1 月 30 日：軸力導入テスト、加振テスト

2012 年 1 月 31 日：地震応答波試験（1 方向）、長周期（1 方向）（累積変形 50m）試験

2012 年 2 月 1 日：地震応答波試験（2 方向）、長周期（2 方向）（累積変形 50m×2）試験

試験場所：

独立行政法人 防災科学研究所 兵庫耐震工学研究センター（E ディフェンス）

(2) 試験体

支承は実大サイズとして、外径Φ800（NR ゴム、東京フアブリック製）の支承を 2 体（予備 1 体を含む）、すべり板を 1 枚製作した。

弾性すべり支承のゴム層厚は 2.5mm、ゴム層数は 3 層、基準面圧は 20N/mm²である。バック鋼板部とフランジ上面には、温度計測用の熱電対を配線するための溝が設けられている。

すべり板は、6mm 厚の SUS 板（SUS304 製）が母材となる 25mm 厚の鋼材（SS400 製）に周辺部の固定ボルトにより固定されている。母材の鋼材には、裏面温度計測用の熱電対を配線するための溝が、温度計測点部分では板厚方向の貫通穴が設けられており、SUS 板の温度を裏面から直接測定できる構造となっている。

試験体の設置状況を写真 2.3.1-1 に、弾性すべり支承試験体およびすべり板の図面を図 2.3.1-1、図 2.3.1-2 に、試験体諸元を表 2.3.1-1 に示す。

なお、断熱材として標準高温用断熱板（D-M-E 双葉、10mm 厚）を用い、試験体固定プレートと支承フランジの間、すべり板と上部ブロックの間に設置した。断熱板の仕様を表 2.3.1-2 に示す。

弾性すべり支承(φ800) NR

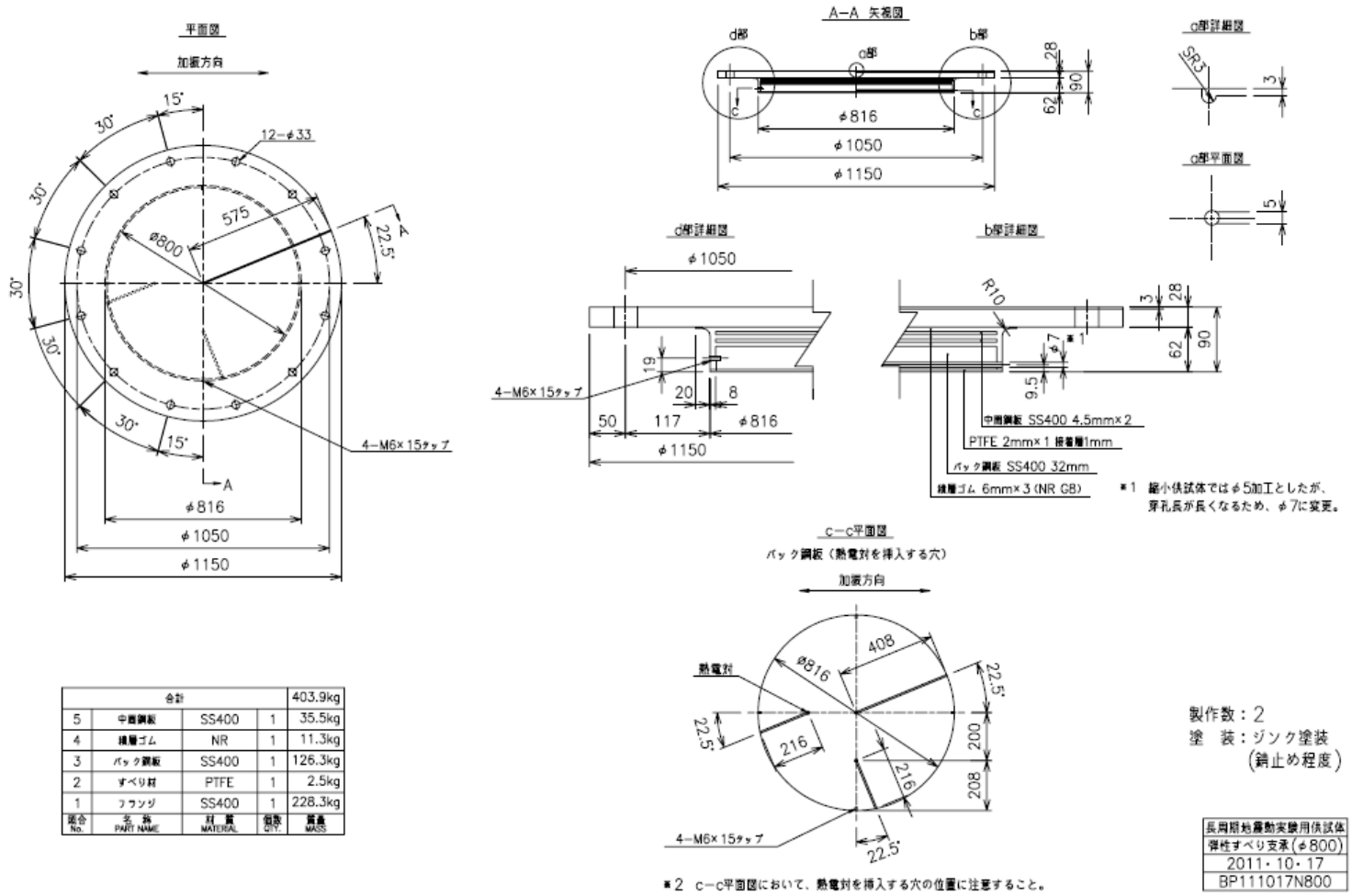


図 2.3.1-1 弾性すべり支承 (高摩擦) φ 8 0 0

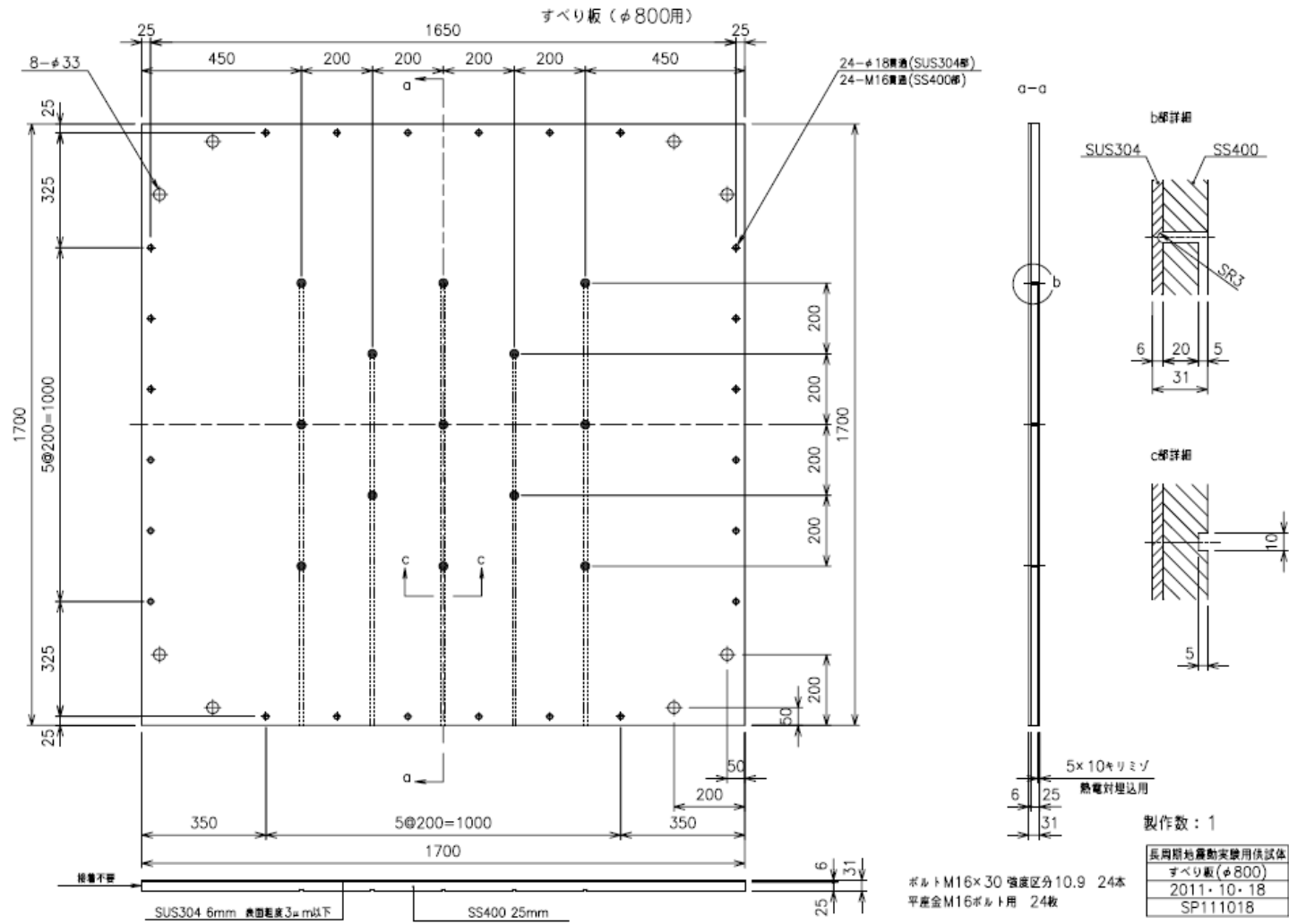


図 2.3.1-2 すべり板

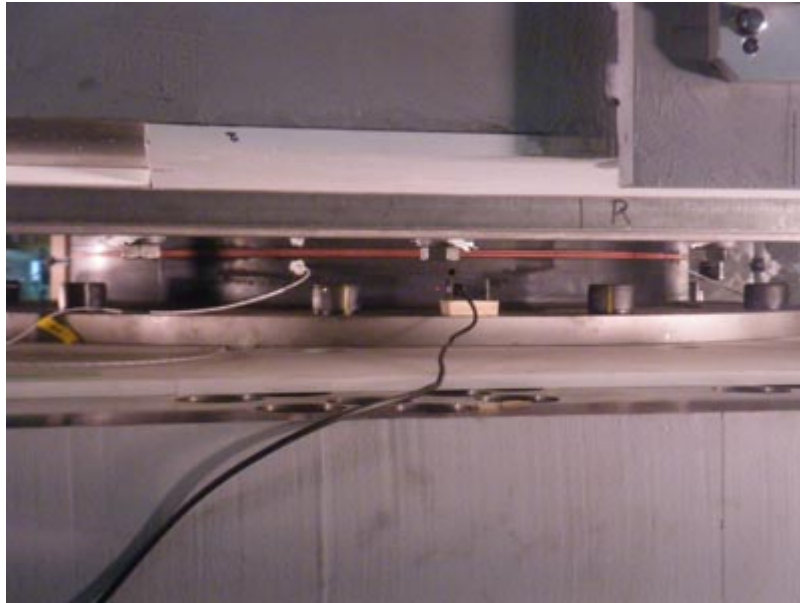


写真 2.3.1-1 試験体の設置状況

表 2.3.1-1 試験体緒元

型式	HMH80N-6-3	
項目	単位	諸元
支承径	mm	φ 800
ゴム一層厚	mm	6
積層数	層	3
PTFE	mm	2 (+接着層 1)
一次形状係数	—	33.3
二次形状係数	—	44.4
鉛直剛性	kN/mm	24133
水平剛性	kN/mm	22.3
摩擦係数	—	0.100
試験体数	—	NR 2 体

表 2.3.1-2 断熱板の仕様

圧縮強度	338 (N/mm ²) (24℃の場合) 103 (N/mm ²) (285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k) (24℃の場合) 0.303W/(m・k) (220℃の場合)
難燃性	94V-0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニウムカーボネート+グラスファイバー+ 不飽和ポリエステル

(3) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平変位（支承とすべり板の相対変位、積層ゴム部の弾性変形）、鉛直変位（積層ゴム高さ）、水平荷重、鉛直荷重、温度（試験体内部・表面、室温）とした。また、試験後に膜厚計により PTFE の厚さを測定し、予備試験体の測定結果と比較した。

支承とすべり板の相対変位は回転角付変位計（東京測振 DPR-600A）により、積層ゴム部の弾性変形はポテンシオメータ式変位計（共和電業 DTP-D-300）により、鉛直変位は渦電流型変位計（キーエンス EX-614V）により計測した。また、水平荷重および鉛直荷重は下部ブロックと試験体固定プレート下部の間に固定された 31 台の 3 分力計ロードセル（共和電業 LSM-700KM）により測定してリアルタイムモニターで合算し、水平方向は u, v 方向成分に変換した。温度計測は、すべり板（SUS 裏面）13 点、ゴム表面 2 点、PTFE 裏（バック鋼板部）3 点、フランジ上面 1 点の計 19 点を設置した。温度計測は、ゴム表面部の 2 点では非接触型の放射温度計（キーエンス FT-H50）を用い、他の計測点は熱電対（K-H- ϕ 0.32）を使用した。

試験体周りの計測位置を図 2.3.1-3 に、分力計の配置を図 2.3.1-4 に示す。

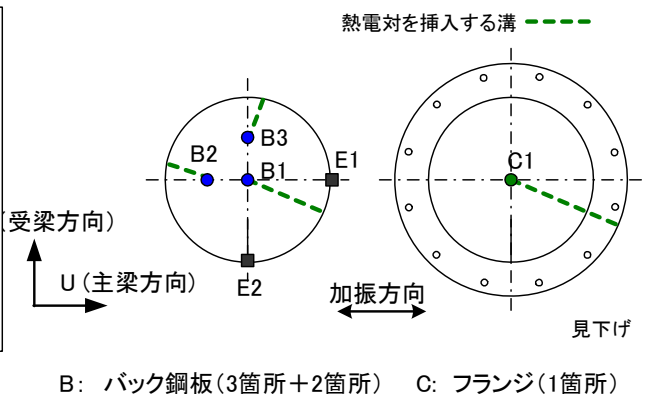
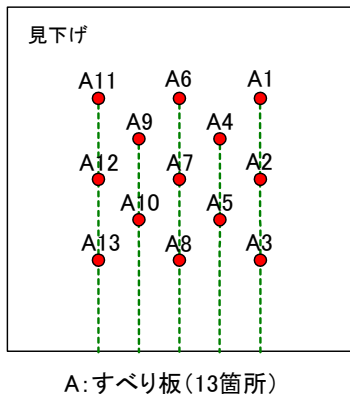
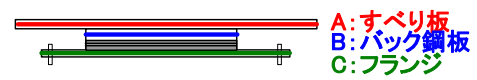
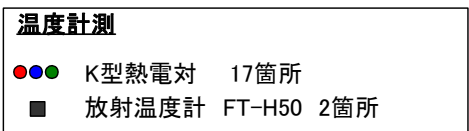
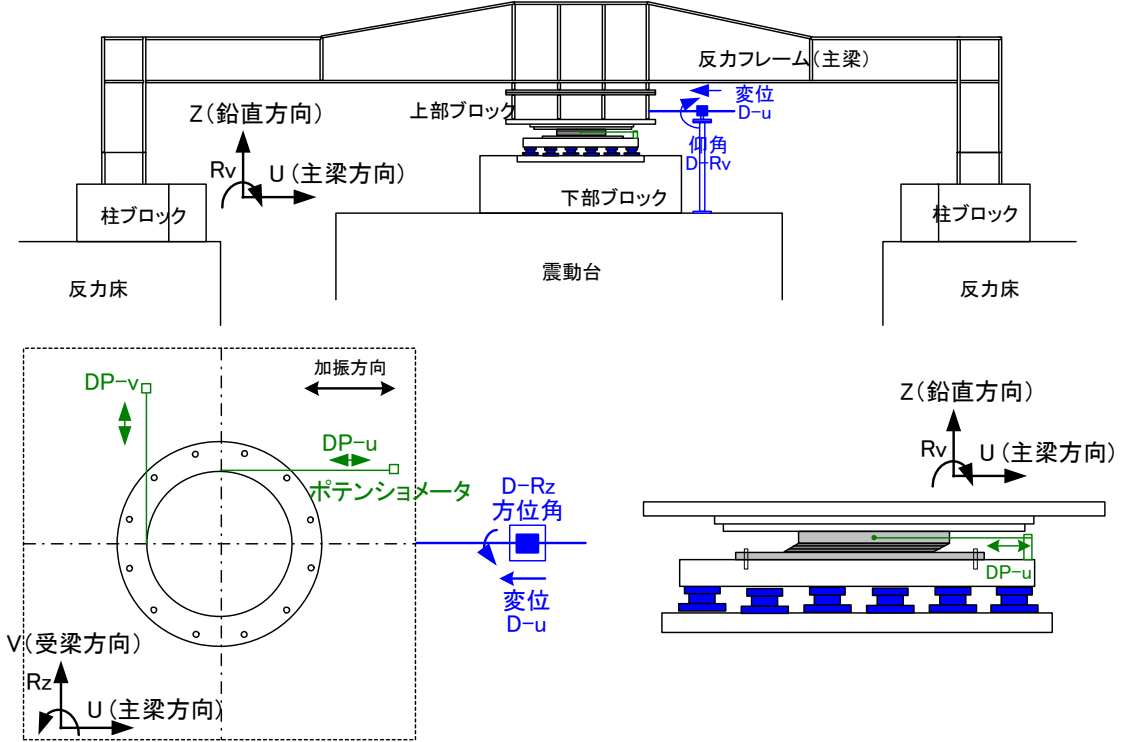
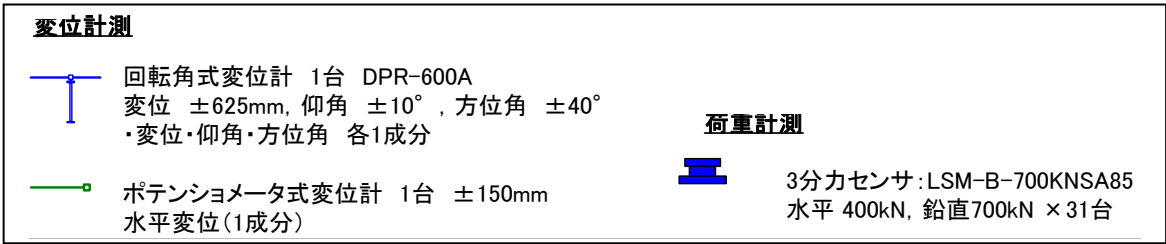


図 2.3.1-3 測定点図 (温度、変位、荷重)

3分力センサ:LSM-B-700KNSA85

水平 400kN, 鉛直700kN × 31

水平U方向 31成分

水平V方向 31成分

鉛直Z方向 31成分

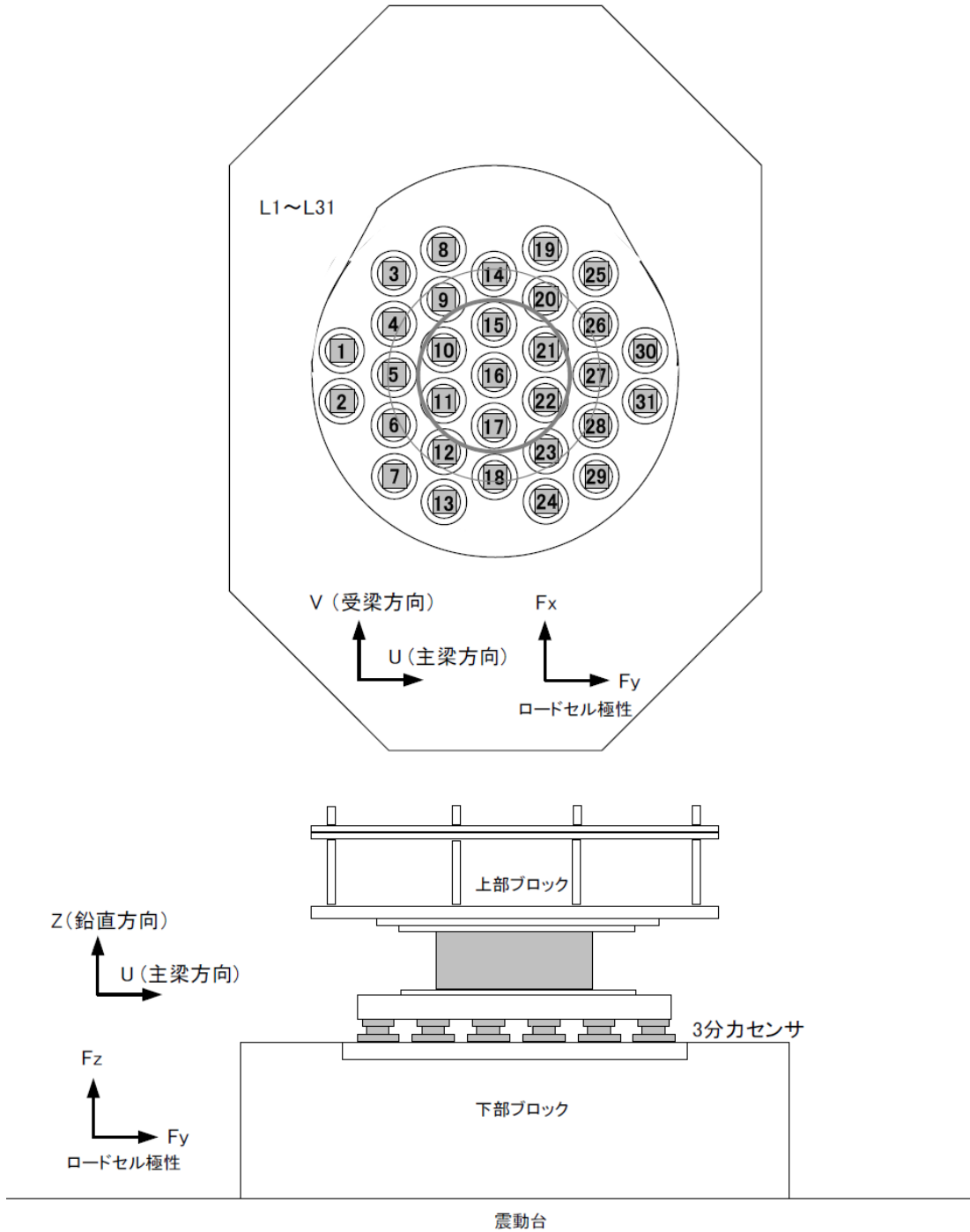


図 2.3.1-4 測定点図 (分力計)

(4) 加振制御方法と実験ケース

震動台の上昇により、面圧(10N/mm²)を載荷した状態で正弦波により水平1方向(u方向)または2方向(u,v方向)に加振させるすべり試験を行なった。各試験は初期温度を管理温度(30℃程度)以下で実施することを目標とした。試験は正弦波による多数回繰り返し試験、地震応答波試験からなり、各試験の前後に基本特性試験(4サイクル)を実施した。(前)基本特性試験は常温で行うため、長周期試験後は試験体の冷却を行った。表2.3.1-3に実験ケース一覧を示す。

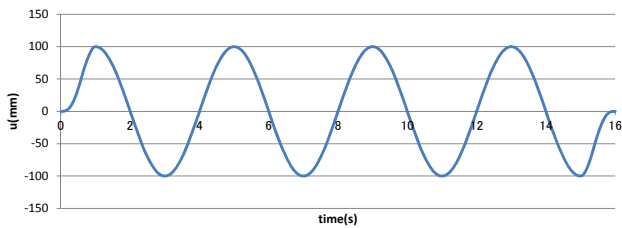
長周期試験では5サイクルを1セットとして、震動台のアクムレータ蓄圧および加振準備のため4サイクル毎に約1分(計6回)のインターバル時間をとった。

基本特性試験と長周期試験(1方向)で用いた加振波には、u方向成分として初頭部と末尾部の1秒分にcos型のテーパ処理を加えた正弦波を、z方向成分として倍調波(周期2秒)の正弦波をそれぞれ用いた。z方向成分波は、本試験と同一条件での震動台単独の事前加振で得られた鉛直変位計測結果に基づき、振幅を基本特性で0.4mm、長周期試験で1.2mmとした。長周期試験(2方向)では、水平面内で円形軌道を描く5サイクル分の加振波とし、初頭部には原点からの、末尾部には原点への移動波形を付加した。付加分の累積変形は有効累積変形には算入しないものとし、円形軌道の半径は累積変形が1方向と等しくなる条件で定めた。

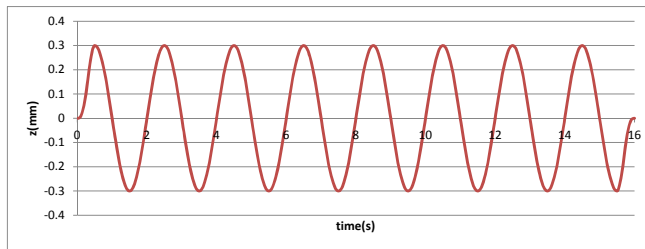
地震応答波試験では、免震周期4秒、降伏せん断力係数を0.03、上部構造を剛体とした1質点モデルを用い、1方向加振用には検討波として提供されたAIC003波(愛知・津島 平均)およびSZO024波(静岡・浜松 平均)を、2方向加振用には東海・東南海・南海3連動地震のFEM解析結果による名古屋市役所地点の想定地震波(ai_nag)を入力して得られた応答変位波形を用いた。試験では応答変位波形のうち主要動部付近の約5分間を抜き出して用いた。図2.3.1-5、図2.3.1-6に載荷に用いた変位波形を示す。

表 2.3.1-3 弾性すべり支承(高摩擦) 試験ケース

実施日	ケース	試験条件	面圧(N/mm ²)	周期(s)	変位(mm)	サイクル(回)	インターバル(回)	累積変形(m)	備考(加振波名称)
1月31日		(前)基本特性-1	10	4	u:100	4	-	1.6	初期基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答(1方向)-1		-	u:110	-	-	13.0	U1-E-aic003L
		地震応答(1方向)-2			u:191			13.2	U1-E-szo024L
	3A	長周期(1方向)		4	u: 400	35(5×7)	6	56.0	U1-SL5Z
		(直後)基本特性-1		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
2月1日		(前)基本特性-2	10	4	u: 100	4	-	1.6	冷却後基本特性の確認 U1-SL4Z
		地震応答(2方向)		-	u [EW]: 102 v [NS]: 85	-	-	1.7	UV1-E-aiL
	3A'	長周期(2方向)-1		4	u:255 v: 255	35(5×7)	6	56.0	UV1-SL5M π/2位相差(円軌道)
	3A'	長周期(2方向)-2		4	u:255 v: 255	35(5×7)	6	56.0	UV1-SL5M π/2位相差(円軌道)
		(直後)基本特性-2		4	u:100	4	-	1.6	繰返し直後の基本特性の確認 U1-SL4Z
		(後)基本特性		4	u:100	4	-	1.6	U1-SL4Z

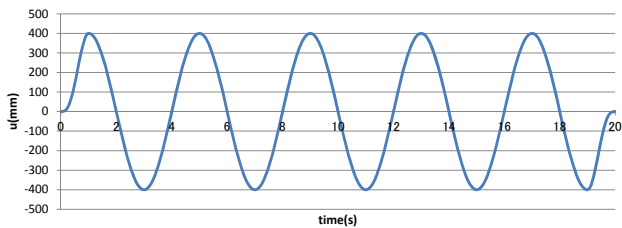


u 成分

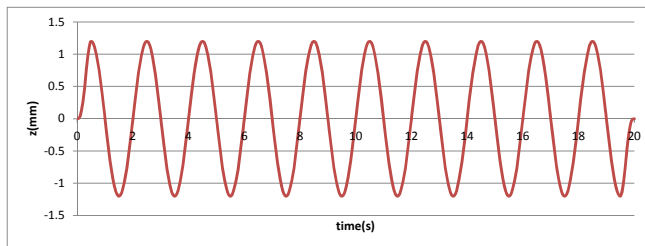


z 成分

(1) 基本特性 U1-SL4Z

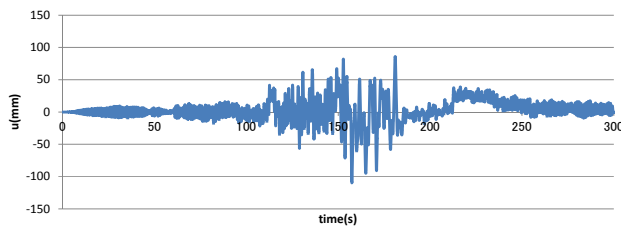


u 成分



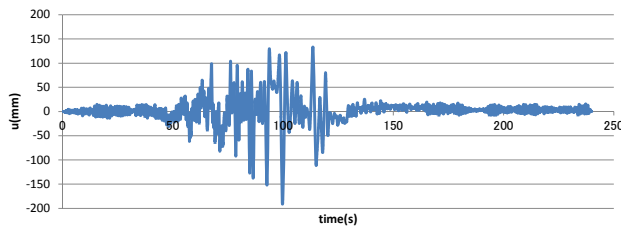
z 成分

(2) 長周期 U1-SL5Z



u 成分

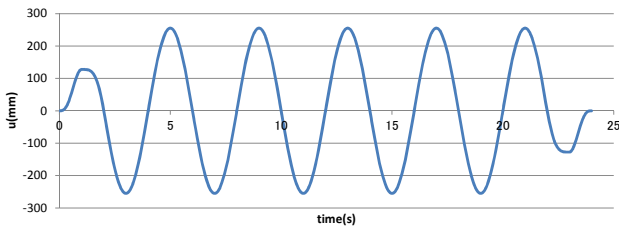
(3) 地震応答 U1-E-aic003L



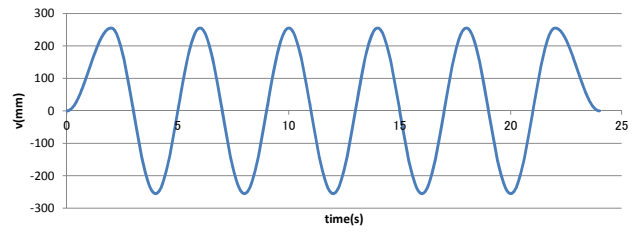
u 成分

(4) 地震応答 U1-E-szo024L

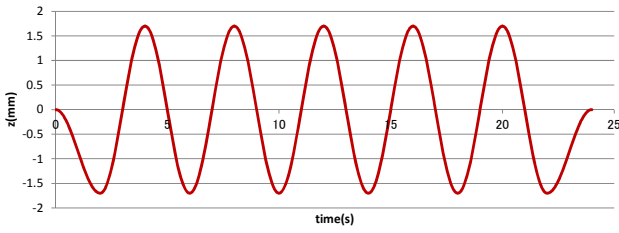
図 2.3.1-5 加振変位波形（1 方向）



u 成分

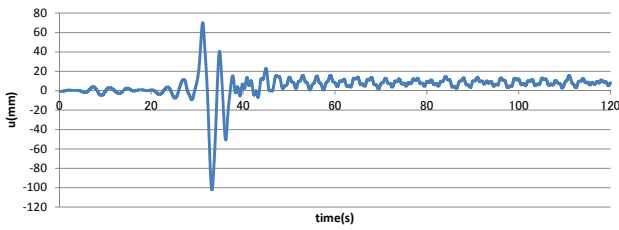


v 成分

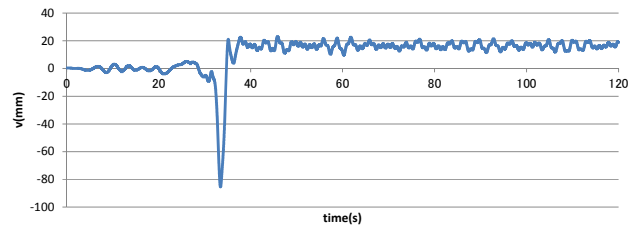


z 成分

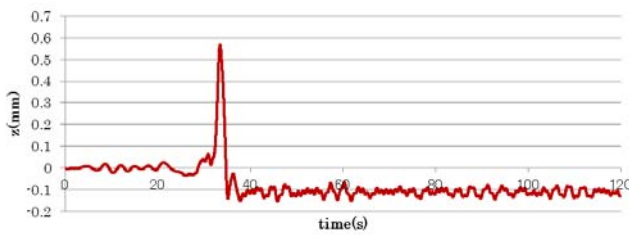
(1) 長周期 UV1-SL5M



u 成分



v 成分



z 成分

(2) 地震応答 U1-E-aic003L

図 2.3.1-6 加振変位波形 (2 方向)

(5) 実験結果

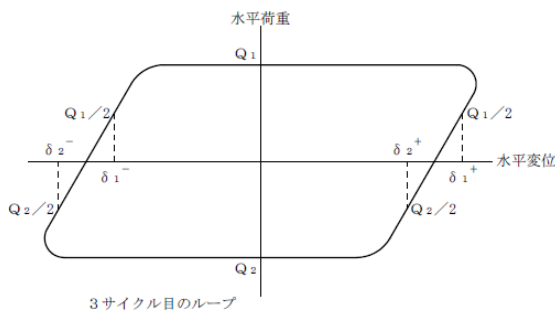
1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、摩擦係数は以下の方法により求める。評価方法は、参考文献^{2.3.1-1)}をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として载荷3サイクルめの荷重-変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各载荷ケースでサイクル毎の荷重-変形関係特性値を読み取ることとする。

a) 水平剛性

荷重-変形関係において、正負の切片荷重の 1/2 の点を結ぶ直線の勾配を読み取り、水平変位の正側と負側で剛性 $Kh1$, $Kh2$ を求め、その平均値を水平剛性 Kh とする (図 2.3.1-7, 式(2.3.1-1)~(2.3.1-3))。



$$Kh_1 = \frac{(Q_1/2 - Q_2/2)}{(\delta_{1^+} - \delta_{2^+})} \quad (2.3.1-1)$$

$$Kh_2 = \frac{(Q_1/2 - Q_2/2)}{(\delta_{1^-} - \delta_{2^-})} \quad (2.3.1-2)$$

$$Kh = \frac{Kh_1 + Kh_2}{2} \quad (2.3.1-3)$$

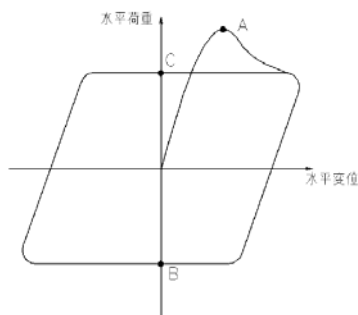
Q_1 : +側の切片荷重の絶対値

Q_2 : -側の切片荷重の絶対値

図 2.3.1-7 水平剛性 Kh の算出方法

b) 摩擦係数

荷重-変形関係において、1波目については最大値 A 点(+側)と B 点(-側)の水平荷重を、2波目以降は水平変位が 0 のときの水平荷重(B 点、C 点)を読み取り、正側と負側で摩擦係数 $\mu 1$, $\mu 2$ を求め、その平均値を摩擦係数 μ とする (図 2.3.1-8, 式(2.3.1-4)~(2.3.1-6))。



$$\mu 1 = Q1/N1 \quad Q1: +側の切片荷重の絶対値 \quad (2.3.1-4)$$

$$\mu 2 = Q2/N2 \quad N1: Q1 時の鉛直荷重 \quad (2.3.1-5)$$

$$\mu = \frac{\mu 1 + \mu 2}{2} \quad Q2: -側の切片荷重の絶対値 \quad (2.3.1-6)$$

$$N2: Q2 時の鉛直荷重 \quad (2.3.1-6)$$

図 2.3.1-8 摩擦係数 μ の算出方法

2) 荷重－変位関係

1方向の試験ケースの荷重－変位関係を、長周期試験について図 2.3.1-9 に、基本特性試験について図 2.3.1-10 にそれぞれ示す。

荷重－変位関係において、(前)基本特性試験および長周期試験繰り返しの初期段階では摩擦係数の低下傾向が大きいためにすべり部分で右下がりの勾配を示す（図 2.3.1-10(a)、図 2.3.1-9(a)）が、繰り返しのに伴い勾配は緩やかとなり（図 2.3.1-9(b)～(g)）、(直後)基本特性試験では弾塑性型に近い履歴形状を示している（図 2.3.1-10(b)）。(前)基本特性試験と(直後)基本特性試験の比較（図 2.3.1-10(a)、(b)）によれば、長周期試験の経験後は履歴形状は扁平に変化しており、履歴面積すなわち1サイクルあたりの吸収エネルギーも1/2程度以下まで低下している。

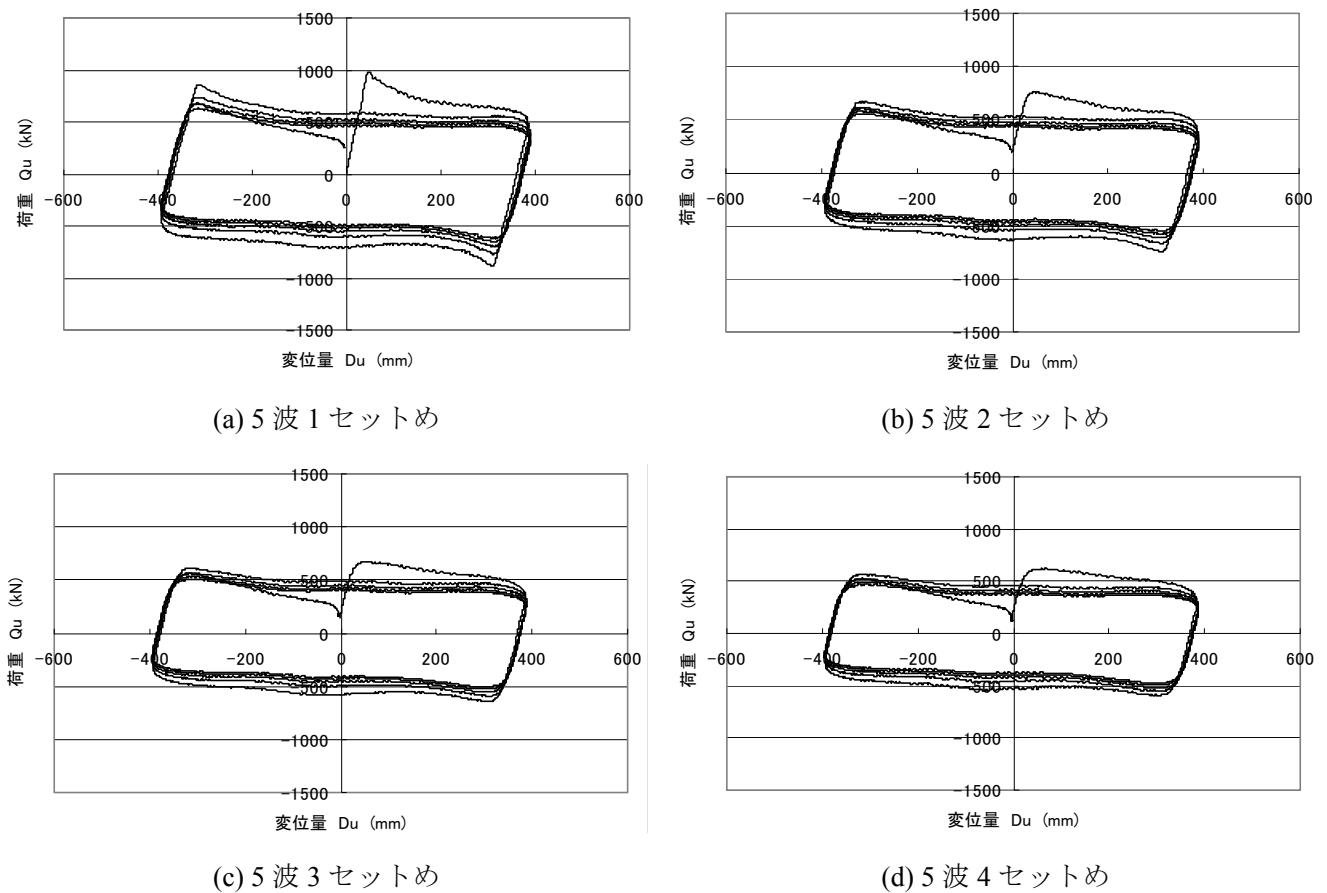
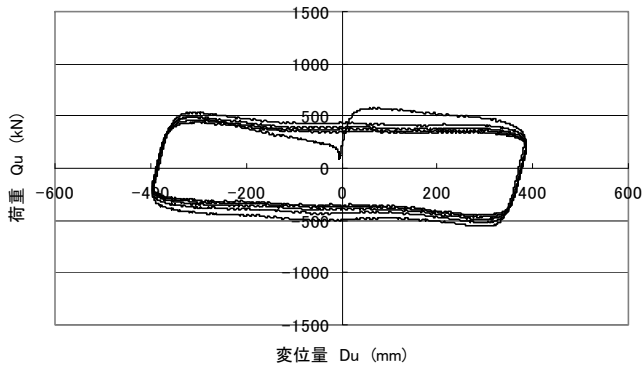
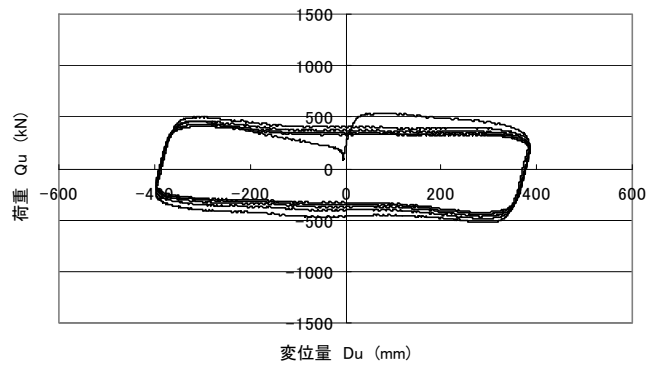


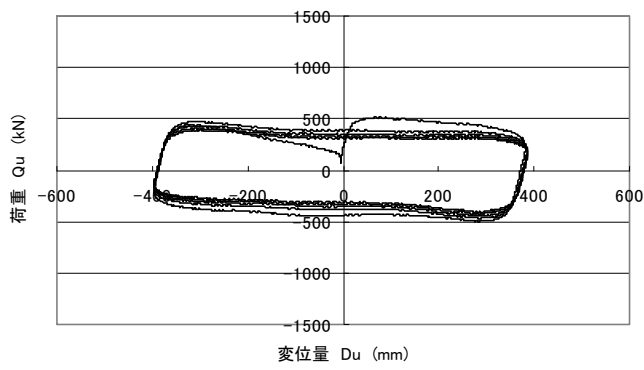
図 2.3.1-9(1) 荷重－変位関係（長周期（1方向）：U1-SL5Z）



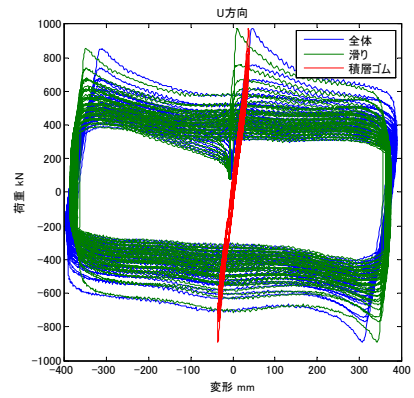
(e) 5波5セットめ



(f) 5波6セットめ

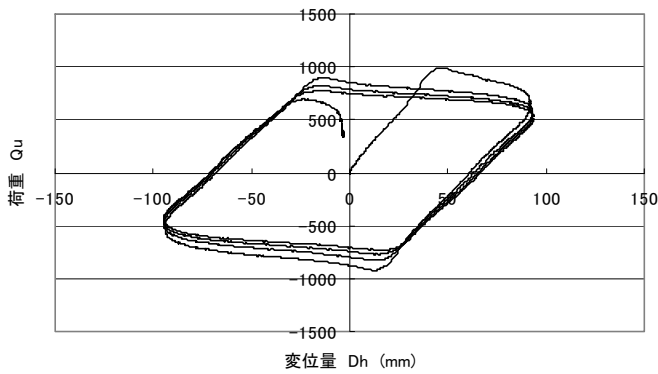


(g) 5波7セットめ

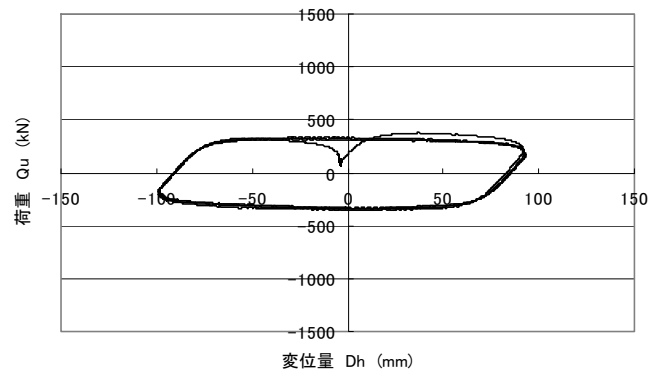


(h) 全体

図 2.3.1-9(2) 荷重-変位関係 (長周期 (1 方向) : U1-SL5Z)



(a) (前)基本特性-1 [1方向試験前]



(b) (直後)基本特性

図 2.3.1-10 荷重-変位関係 (基本特性 : U1-SL4Z)

地震波加振（1方向）の荷重－変位関係のうち、U1-E-szo024L のケースについて図 2.3.1-11 に示す。図 2.3.1-5(4)に示すとおり同地震応答波の主要動部分は時刻 50 秒から 130 秒の間にあり、対応する図 2.3.1-11(a)ですべりを生じていることが解る。同図では、载荷が進むにつれて降伏荷重が低下する様子が確認できるが、その低下量は(前)基本特性と同程度である。時刻 150 秒以降では弾性変形のみですべりは生じていない。

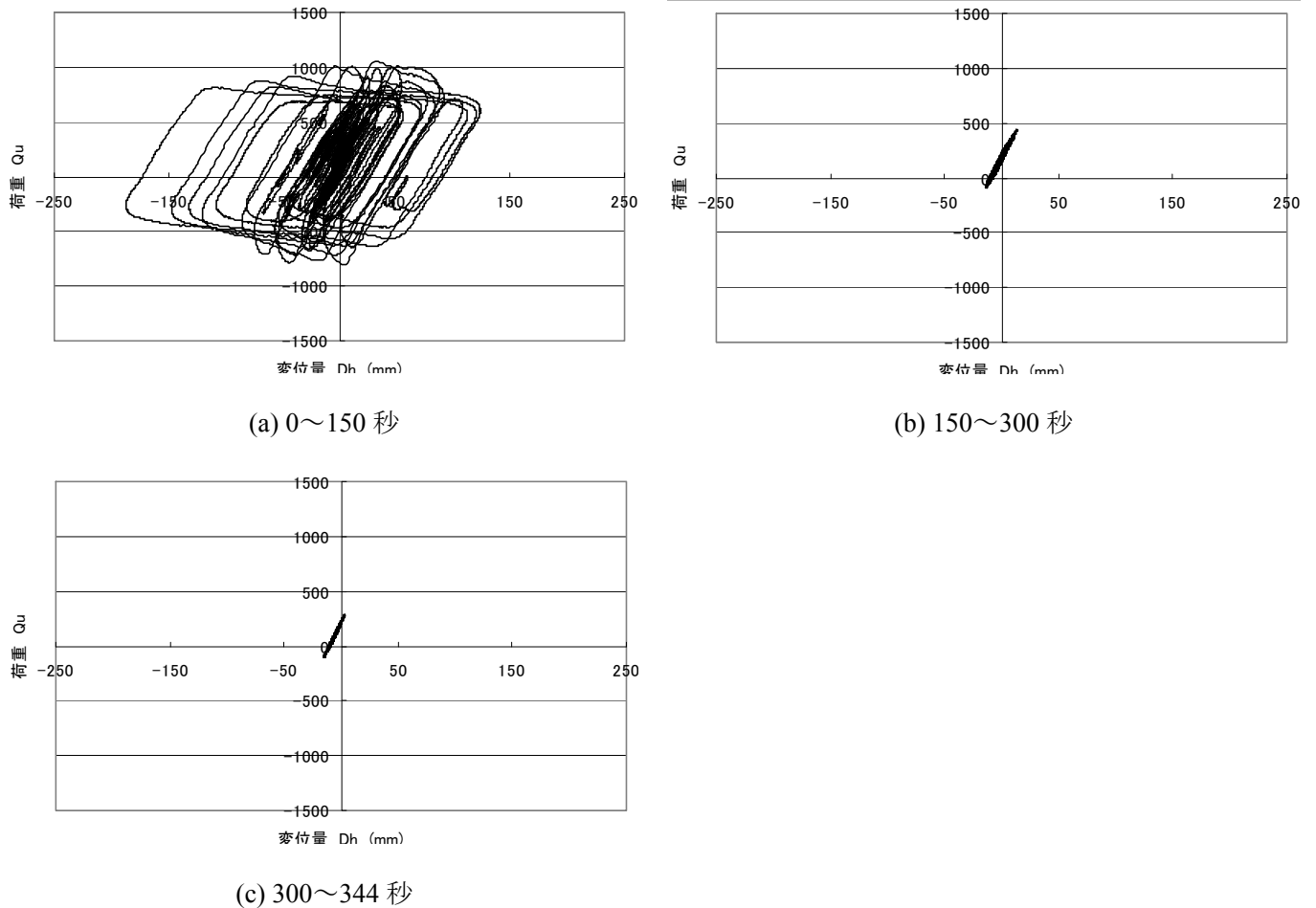


図 2.3.1-11 荷重－変位関係（地震応答（1方向）：U1-E-szo024L）

3) 鉛直荷重変動

図 2.3.1-12 に長周期（1方向）のケースの鉛直荷重変動波形を示す。

全ケースを通じて鉛直荷重の下限目標を 5000kN として軸力を導入した。各セットの頭部および終部のスパイクを除き、水平方向の载荷中は鉛直荷重は中央値に対して±5%程度変動しているが、おおむね 5000kN 以上の軸力を確保している。

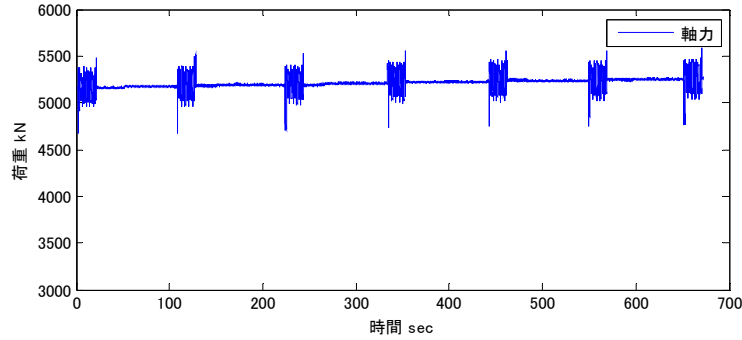


図 2.3.1-12 軸力変動（長周期（1方向）：U1-SL5Z）

4) 摩擦係数

a) 基本特性試験

基本特性試験の摩擦係数の結果を表 2.3.1-4 に示す。

基本特性試験の摩擦係数 μ_0 は 3 サイクル目を評価した。(前)基本特性の値は設計値に比べて約 1.5 倍となっている。その理由は、設計値は支承の標準面圧 (20N/mm^2) で設定しているのに対して実験の実施面圧は 10N/mm^2 であり、面圧依存性により摩擦係数が大きな値を示しているものとみられる。

累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下している。

表 2.3.1-4 摩擦係数結果（基本特性試験）

試験	基本特性試験 の摩擦係数 μ_0
(前)基本特性-1	0.147
(直後)基本特性-1	0.062

b) 長周期試験

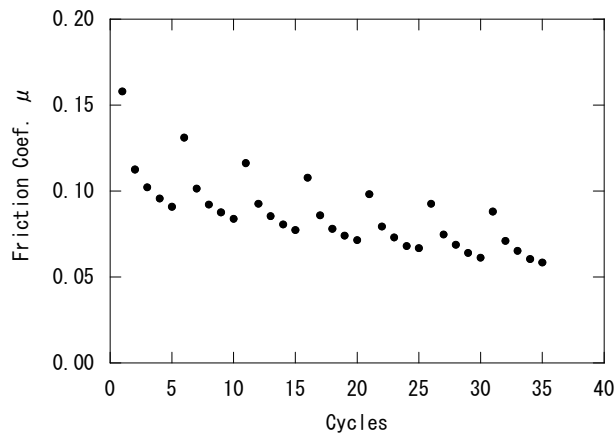


図 2.3.1-13 摩擦係数の変化（長周期（1方向））

図 2.3.1-13 に長周期試験（1 方向）における摩擦係数の変化を示す。各セットとも 1 サイクルめで大きな値を示しているが、これは図 2.3.1-8 に示すように、摩擦係数の算定において 1 サイクルめのみ静摩擦の影響を含むためである。各セットと毎に繰り返しの伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向が確認できる。表 2.3.1-5 に長周期試験（1 方向）の結果一覧を示す。

表 2.3.1-5 長周期 (1 方向) 試験 試験結果一覧

試験番号	回数	時間 (sec)	Q3		Q4		摩擦係数			累積	セット累積	セット累積	累積	温度
			鉛直荷重 (kN)	水平荷重 (kN)	鉛直荷重 (kN)	水平荷重 (kN)	Q3	Q4	平均	エネルギー	エネルギー	すべり量	すべり量	T (°C)
							係数	係数	係数	Σ E(kN・mm)	(kN・mm)	(mm)	(mm)	
B5MU5_7set -1	1	4	5306.56	975.59	5290.47	700.82	0.184	0.132	0.158	975681	975681	1295	1295	31
	2	8	5201.61	575.75	5301.50	606.50	0.111	0.114	0.113	1830917	1830917	2662	2662	57
	3	12	5265.33	526.93	5293.29	552.71	0.100	0.104	0.102	2622366	2622366	4043	4043	67
	4	16	5225.29	482.14	5286.53	525.65	0.092	0.099	0.096	3373237	3373237	5426	5426	68
	5	20	5203.81	460.68	5290.94	494.50	0.089	0.093	0.091	4092165	4092165	6805	6805	74
B5MU5_7set -2	6	24	5342.90	759.73	5285.00	634.28	0.142	0.120	0.131	4964814	872649	1337	8142	79
	7	28	5241.97	525.24	5286.85	544.52	0.100	0.103	0.102	5738328	1646163	2723	9528	96
	8	32	5256.26	481.32	5343.51	497.82	0.092	0.093	0.092	6460469	2368304	4114	10919	105
	9	36	5265.57	454.00	5283.11	471.89	0.086	0.089	0.088	7148271	3056106	5508	12314	113
	10	40	5259.56	441.54	5339.74	447.70	0.084	0.084	0.084	7802246	3710081	6886	13691	121
B5MU5_7set -3	11	44	5352.68	671.37	5354.60	573.43	0.125	0.107	0.116	8615302	813056	1358	15049	109
	12	48	5235.98	483.52	5325.57	496.89	0.092	0.093	0.093	9335398	1533152	2755	16446	126
	13	52	5243.05	447.34	5321.53	456.45	0.085	0.086	0.086	10007195	2204950	4155	17846	134
	14	56	5251.89	419.93	5307.12	431.32	0.080	0.081	0.081	10646497	2844251	5558	19249	140
	15	60	5241.46	405.00	5303.20	410.88	0.077	0.077	0.077	11249803	3447557	6932	20623	143
B5MU5_7set -4	16	64	5418.51	621.68	5345.22	539.01	0.115	0.101	0.108	12012532	762729	1366	21989	134
	17	68	5267.08	454.79	5345.55	458.83	0.086	0.086	0.086	12685946	1436143	2762	23384	149
	18	72	5277.01	414.90	5379.46	418.75	0.079	0.078	0.078	13314303	2064500	4164	24787	157
	19	76	5275.15	387.73	5339.74	399.14	0.074	0.075	0.074	13911908	2662105	5569	26192	162
	20	80	5280.10	372.74	5334.28	386.97	0.071	0.073	0.072	14480634	3230831	6956	27578	166
B5MU5_7set -5	21	84	5436.95	580.53	5421.52	487.43	0.107	0.090	0.098	15201244	720610	1373	28951	153
	22	88	5309.39	424.82	5407.63	426.12	0.080	0.079	0.079	15837019	1356385	2779	30357	167
	23	92	5292.73	395.16	5411.86	387.39	0.075	0.072	0.073	16426766	1946132	4179	31758	174
	24	96	5308.03	362.41	5413.48	368.94	0.068	0.068	0.068	16989455	2508821	5588	33166	181
	25	100	5301.45	355.14	5358.55	358.40	0.067	0.067	0.067	17527051	3046417	6985	34563	184
B5MU5_7set -6	26	104	5437.33	544.00	5394.27	461.02	0.100	0.085	0.093	18220377	693326	1366	35928	170
	27	108	5294.88	397.61	5393.52	403.84	0.075	0.075	0.075	18816324	1289274	2759	37322	182
	28	112	5286.45	365.03	5378.44	368.30	0.069	0.068	0.069	19374745	1847695	4162	38725	190
	29	116	5308.48	337.35	5384.80	347.71	0.064	0.065	0.064	19907539	2380488	5576	40139	196
	30	120	5278.58	321.39	5387.87	332.38	0.061	0.062	0.061	20412991	2885940	6964	41527	197
B5MU5_7set -7	31	124	5450.19	516.41	5389.33	440.09	0.095	0.082	0.088	21053056	640064	1366	42893	183
	32	128	5305.07	378.70	5401.49	382.25	0.071	0.071	0.071	21635788	1222797	2805	44332	195
	33	132	5297.40	344.36	5406.28	355.05	0.065	0.066	0.065	22169663	1756672	4221	45748	202
	34	136	5324.18	323.29	5405.65	327.13	0.061	0.061	0.061	22675529	2262538	5636	47163	207
	35	140	5324.09	306.27	5416.46	322.31	0.058	0.060	0.059	23155738	2742746	7033	48560	207

IV-2.3.1-17

5) 温度特性

a) 最大温度

各測定点における最大温度を表 2.3.1-6 に、長周期試験（1 方向）における試験体温度の時間変化を図 2.3.1-14 に示す。

表 2.3.1-6、図 2.3.1-14 より、7セット終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）-1 で 220℃、長周期試験（2 方向）-2 で 260℃まで、それぞれ上昇した。

本実験の試験体に用いている PTFE 材料の材料特性表によれば、使用温度範囲は-240℃～260℃、融点は 320℃以上であり、長周期試験（2 方向）-2 直後のすべり板中央部の温度は材料の軟化が始まる 260℃に辛うじて達している。すべり板内の温度分布を図 2.3.1-11 に示す長周期試験（1 方向）のケースで見ると、中央部の A7に加えて A9, A10, A12 の 4 点がほぼ同様の温度変化を見せており、摩擦熱発生領域の中心がこれら 4 点の付近にあったものと推定できる。同じケースの分力計による軸力計測結果においても、軸力中心が支承中心よりも -u 側にややずれていた傾向が確認されている。

PTFE 裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向があった。

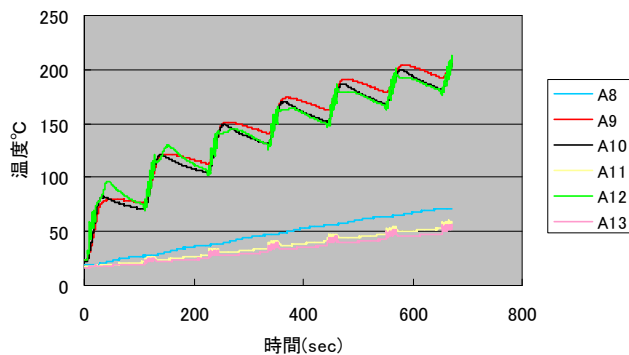
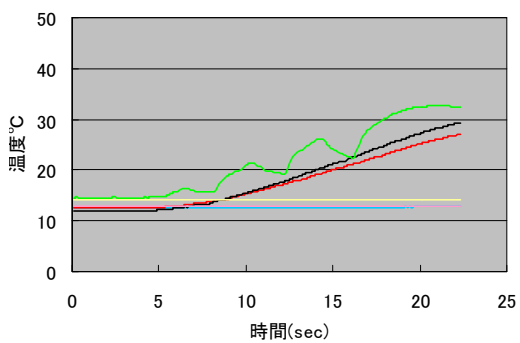
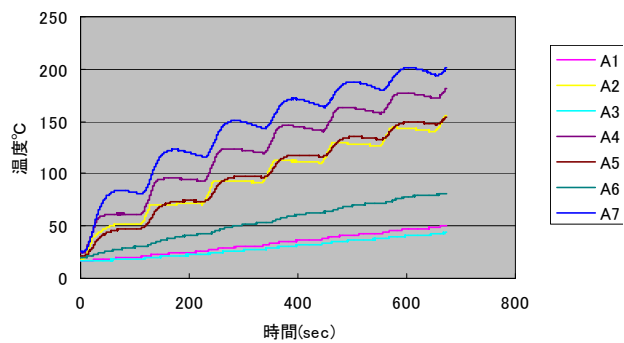
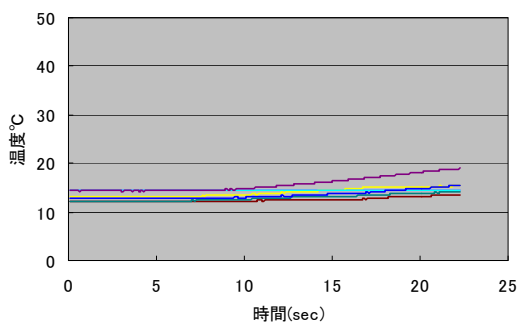
なお、地震応答波試験では、すべり板の温度は 70℃前後まで上昇するが載荷直後のゴム表面は 30℃前後までの上昇にとどまり、常温に近い状態であった。

フランジ部の温度はすべてのケースにおいて 12～20℃で推移しており、断熱板により熱の伝達が遮断されていたことが確認できる。

表 2.3.1-6 温度計測結果（最大温度、単位℃）

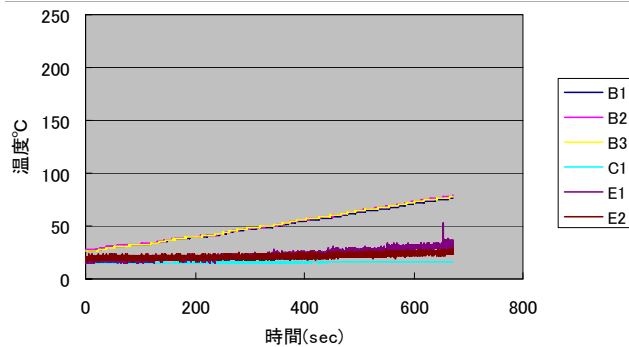
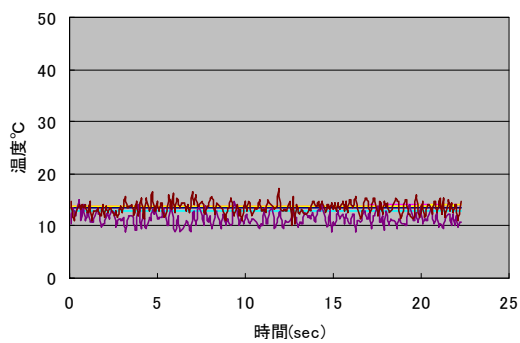
試験 No.	01 室温	A7 すべり板 (中央部)	B1 PTFE 裏 バック鋼板 (中央部)	E2 ゴム表面	C1 フランジ
(前)基本特性-1	14.1→14.2	12.8→15.5	13.5→13.6	14.6→14.6	12.8→12.9
地震応答 (1 方向) -2	14.6→14.6	22.2→40.8	19.8→25.3	16.7→19.9	13.9→14.6
長周期 (1 方向)	14.8→14.9	25.3→201.2	26.9→76.5	19.1→28.3	15.3→15.9
(直後)基本特性-1	14.2→14.9	15.5→203.8	13.6→83.9	14.6→26.2	12.9→16.0

注：加振前→加振後



(a) すべり板

(a) すべり板



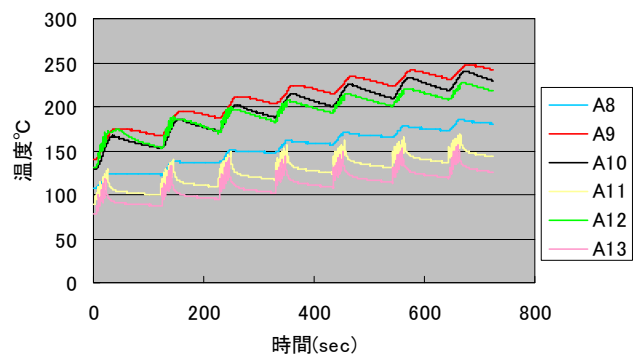
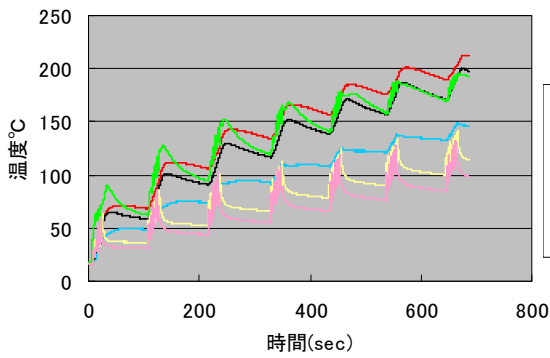
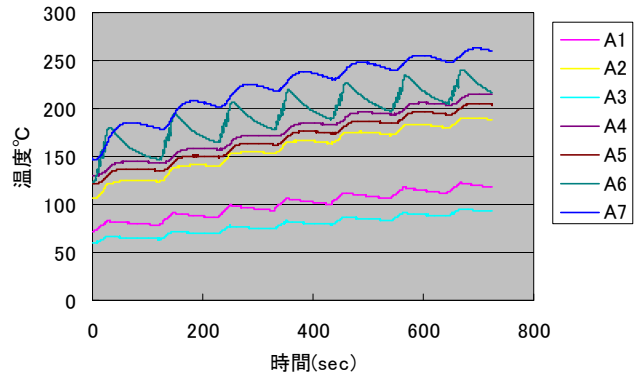
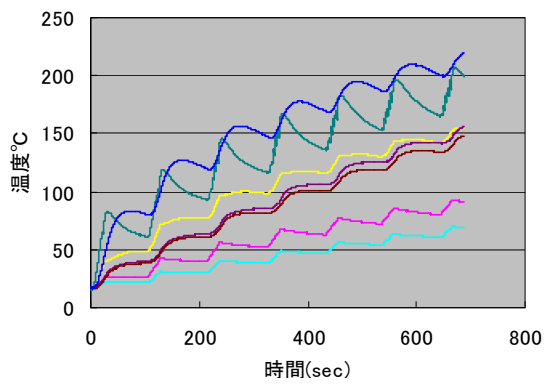
(b) 支承

(b) 支承

(1) (前)基本特性試験

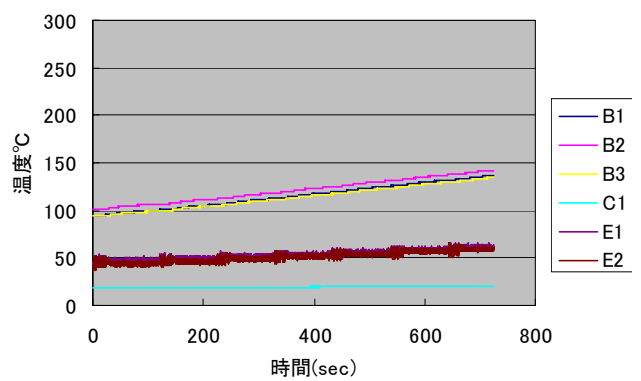
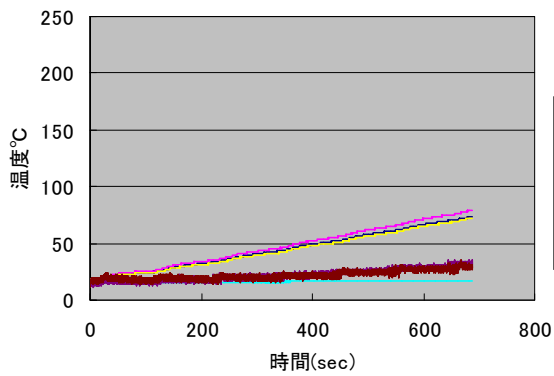
(2) 長周期 (1 方向)

図 2.3.1-14(1) 試験体の温度変化



(a) すべり板

(a) すべり板



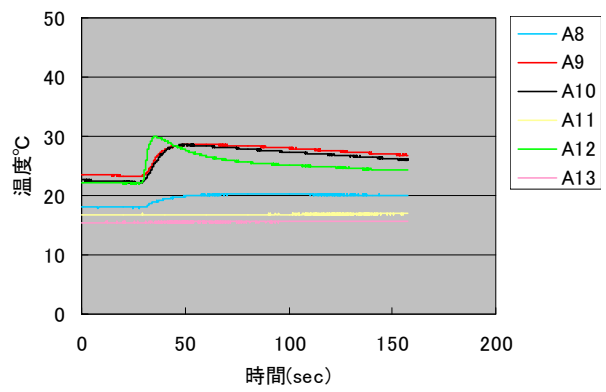
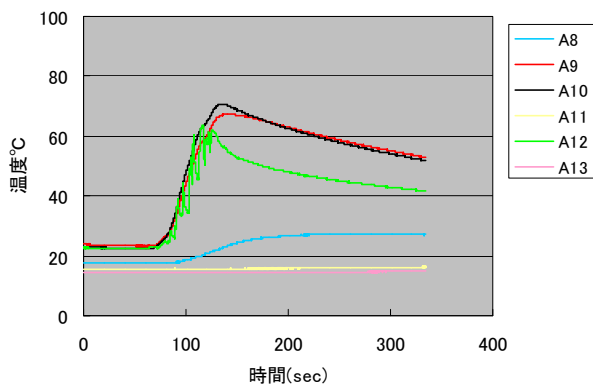
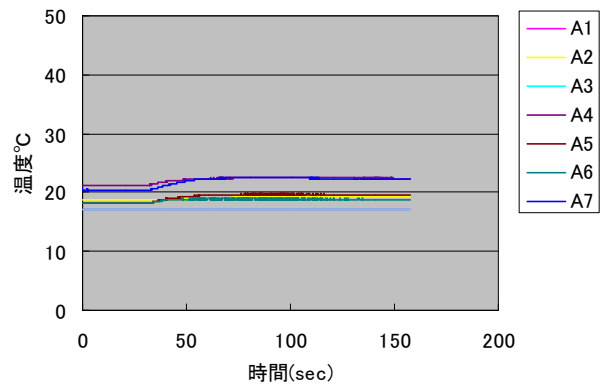
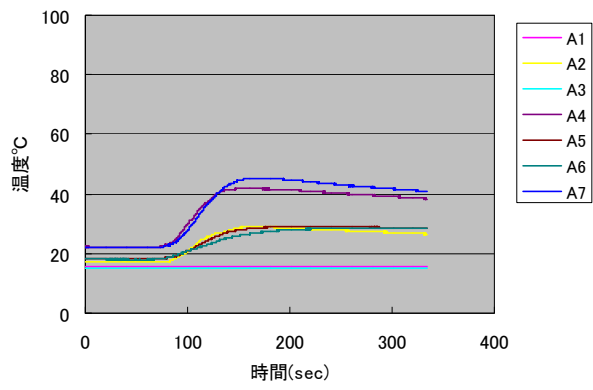
(b) 支承

(b) 支承

(3) 長周期 (2方向) -1

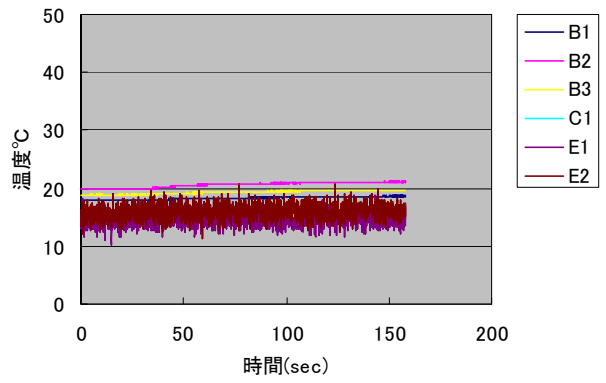
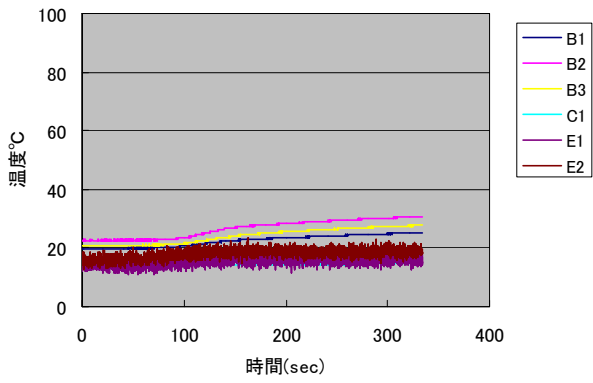
(4) 長周期 (2方向) -2

図 2.3.1-14(2) 試験体の温度変化



(a) すべり板

(a) すべり板



(b) 支承

(b) 支承

(5) 地震応答 (1方向) -2 : U1-E-szo024L

(6) 地震応答 (2方向) : UV1-E-aiL

図 2.3.1-14(3) 試験体の温度変化

6) 摩擦係数と繰り返しパラメーターとの関係

繰り返しを表現するパラメーター（時間、すべり板中央温度、累積すべり変位、累積吸収エネルギー）と摩擦係数の関係を図 2.3.1-15 に示す。

各パラメーターとも連続載荷状態にある各セット内では摩擦係数が堅調に低下するが、インターバルを挟むことで摩擦係数が回復（上昇）する傾向があり、いずれのパラメーターも連続加振状態と加振休止状態を統一的に表現することは難しいと思われる。

繰り返しによる摩擦係数が低下する要因は、すべり面の摺動によって熱エネルギーが投入されすべり材およびすべり面の温度が上昇するため、インターバルによる摩擦係数の回復は放熱によってすべり材およびすべり面の温度が低下するためと考えられる。以上より、すべり面温度は摩擦係数を規定するパラメータとして直接的であるが、すべり板の温度が均一でないすべり開始直後の状態では、摩擦係数を精度よく推定するためのパラメータとして最適とは言い難い。また、応答解析において摩擦係数の変動を追うためには、ステップ毎に熱収支解析を連動させてすべり面およびすべり材の温度分布を推定する必要があり、解析が複雑化することになる。

一方、投入エネルギーから逸散エネルギーを差し引いたエネルギー収支をパラメータとして繰り返しに伴う摩擦係数の変動を表現すれば、インターバルによる熱エネルギー逸散の影響を取り込むことも可能となり定式化もし易くなると考えられる。

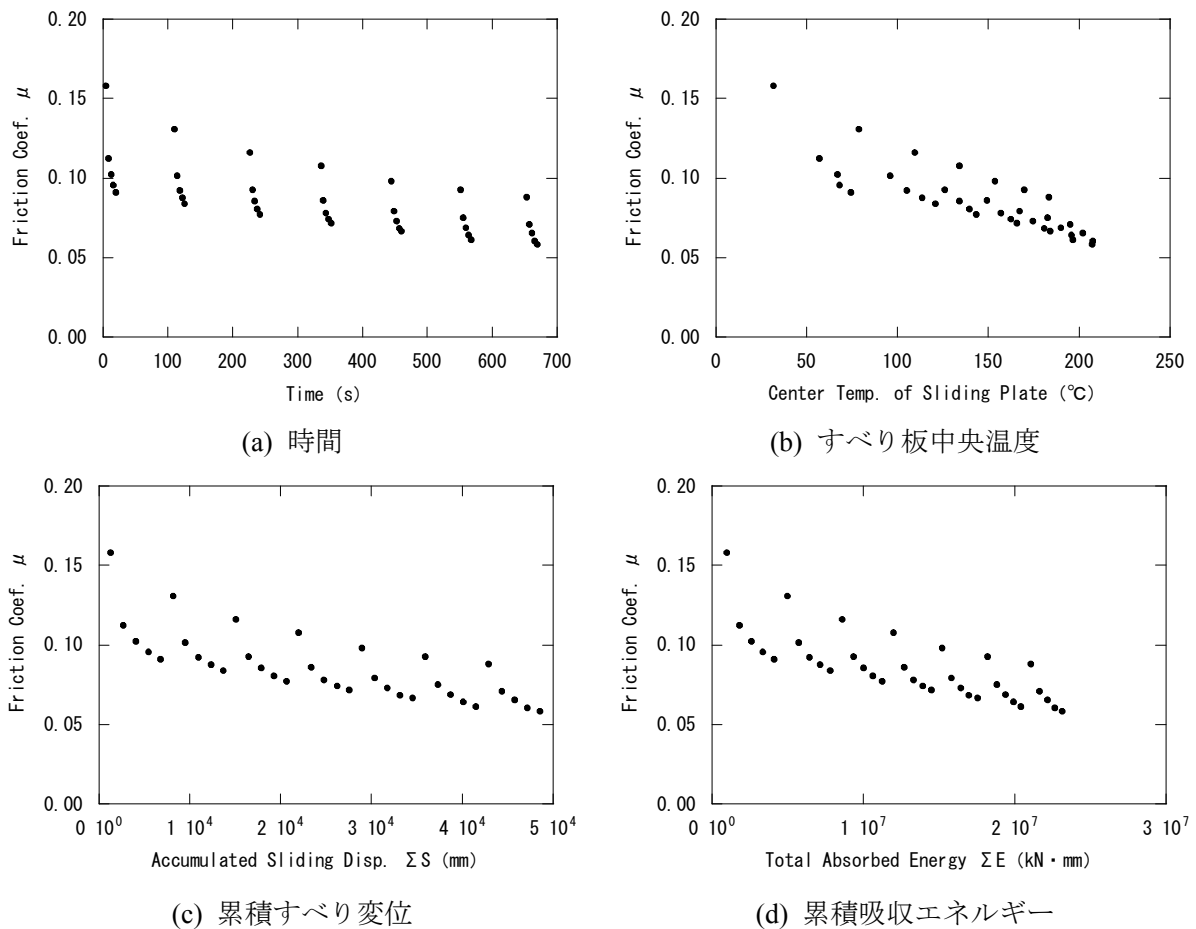


図 2.3.1-15 摩擦係数の繰り返し依存性（長周期（1 方向））

図 2.3.1-16 に累積吸収エネルギーの時間変化を示す。累積吸収エネルギーは、長周期試験では 1 方向、2 方向とも共通で载荷に伴って堅調に増加する一方、地震応答波試験では主要動付近のみで増加している。添付資料に示す長周期試験（1 方向）の結果によれば、図 2.3.1-16(b)に示す地震応答波試験-2 の累積吸収エネルギーは長周期試験の 3 サイクル相当以下である。同図(d)でも確認できるように、地震応答波試験の主要動付近（50 秒間）の累積吸収エネルギーの増加量は、長周期試験の 3 サイクル（12 秒間）相当に達しておらず、最終的な累積吸収エネルギー量は長周期試験の 1/10 以下となっている。言い換えれば、長周期試験は地震応答波試験の 10 倍相当以上の累積吸収エネルギーを確保したことになる。

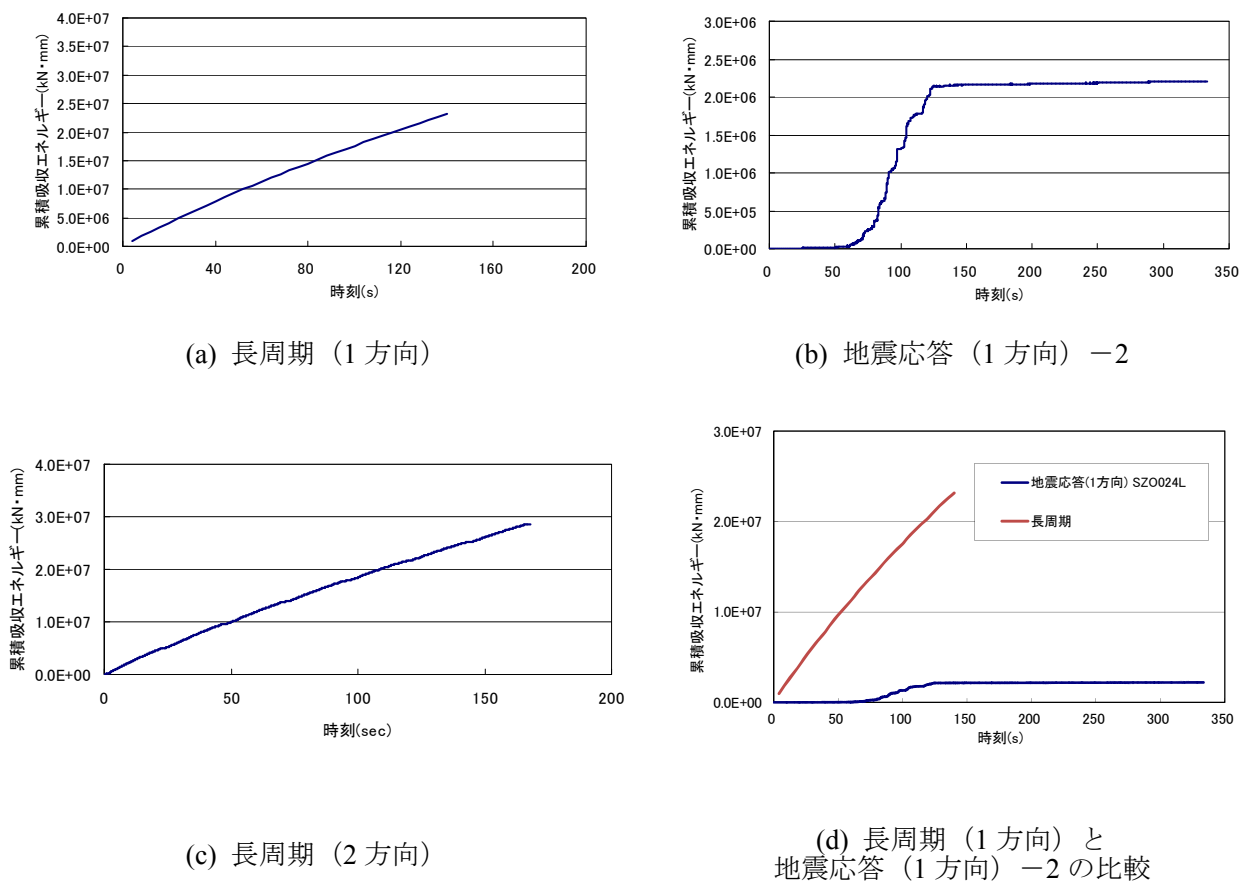


図 2.3.1-16 累積吸収エネルギーの時間変化

7) 外観および膜厚の変化

写真 2.3.1-2 に全ケース試験後の試験体の外観を示す。すべり支承試験体は長周期および限界試験を経験しているにもかかわらず、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。第Ⅲ部 1.3.4 に記載した縮小試験体では面圧 $40\text{N}/\text{mm}^2$ までの試験を実施したため、すべり面の温度上昇に伴い PTFE が軟化する現象が見られたが、今回の試験では面圧が低いことも有り同様の現象は確認されなかった。

ただし、写真 2.3.1-3(b)に示すとおり、試験体の取り外し後にすべり板のバック鋼板部と SUS 製のすべり板のボルト結合部付近（u-側の中央部）で SUS 板中央部のむくりが確認された。時間

を追って鋼材と SUS 材の隙間を確認すると、試験直後（写真 2.3.1-3(a)）では 2mm 程度の隙間がみられる程度であるが、試験後 3 日経過後（写真 2.3.1-3(b)）では 10mm 程度まで隙間が広がっている。

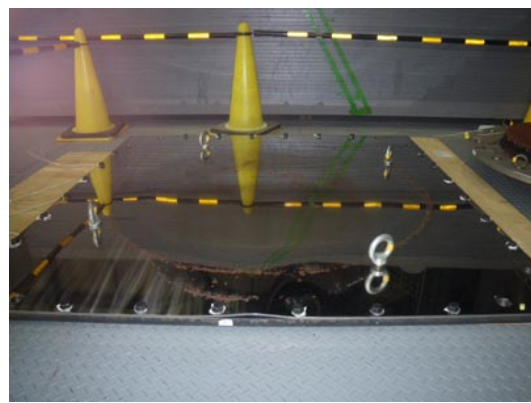
図 2.3.1-17 に示した長周期試験のすべり板温度分布をみると、中央より u+側の A4,A5 点よりも u-側の A9,A10 点の方が温度が高い傾向にあり、温度による熱膨張の影響が u-側に表れたものと推察できる。すべり板のある部位が初期の 15°C から 260°C まで上昇する場合、線膨張係数を 17.3 μ /°C (SUS304) として、該当部分のひずみ ϵ は以下のとおりとなる。

$$\epsilon = 17.3 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}] \times (260-15) [^\circ\text{C}] = 4238.5 \times 10^{-6}$$

試験後に隙間が広がったことから、摩擦熱による熱膨張により支承との接触部付近で SUS 板が塑性化し、その後の冷却により板の中央付近が収縮するに伴って SUS 板の周囲部分では圧縮力が加わったことが原因として考えられる。

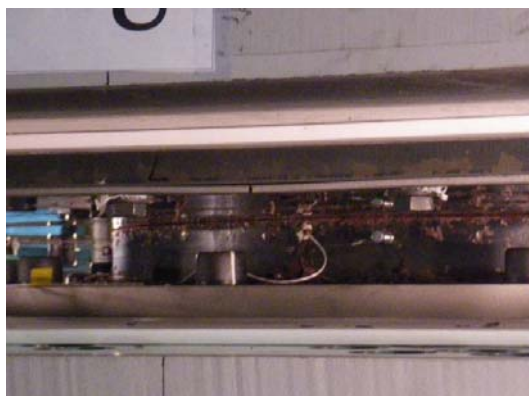


(a) 弾性すべり支承 (No.1)
(写真右方 : +u 方向)



(b) すべり板
(写真上方 : u+方向)

写真 2.3.1-2 試験実施後の試験体の状況



(a) 試験 3 日目終了直後
(2/1, 16:26)



(b) 試験後 3 日経過
(2/4, 13:03)

写真 2.3.1-3 すべり板 SUS 材のむくり (u-側)

また、全ケース試験後の弾性すべり支承試験体について PTFE 材の膜厚を測定した。試験で使用した支承(No.1)では事前に膜厚測定ができなかったため、未使用の予備試験体(No.2)について測定して比較した。

膜厚測定は PTFE 面表面からバック鋼板までの厚みを計測するので、計測値は PTFE 厚（規格値 2mm）と接着層厚（同 1mm）の合計厚さとなる。図 2.3.1-17 に膜厚測定位置を、表 2.3.1-7 に膜厚測定結果を示す。

13 点の平均値で比較すると膜厚は 0.054mm の減少となっており、2mm の PTFE 膜厚に比べて変化量は 3%未満と小さい。

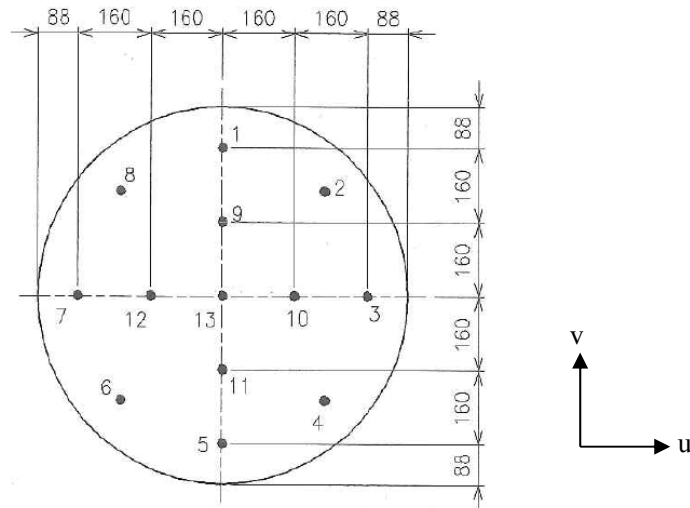


図 2.3.1-17 膜厚測定位置

表 2.3.1-7 膜厚測定結果

単位：mm

測定点	No.1	No.2	測定点	No.1	No.2
	本試験体 (試験後)	予備試験体 (未使用)		本試験体 (試験後)	予備試験体 (未使用)
1	3.30	3.28	8	3.19	3.38
2	3.35	3.29	9	3.41	3.42
3	3.37	3.42	10	3.45	3.48
4	3.40	3.47	11	3.40	3.45
5	3.38	3.29	12	3.35	3.40
6	3.32	3.21	13	3.43	3.98
7	3.22	3.26	全点平均	3.356	3.410

7) まとめと今後の課題

すべりに伴う発熱・放熱環境や累積エネルギーの上昇速度をより現実に近い状態で再現し、摩擦特性の変化や温度上昇、スケール効果を把握することを目的として、E-ディフェンスの大型震動台を用いて実大試験体（Φ800）の長振幅高速繰り返し試験を実施した。以下に、本実験から得られた知見をまとめて示す。

(1) 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化

累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下している。各セット毎に繰り返しに伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向が確認できる。

(2) 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

長周期試験終了後のすべり板温度は、長周期試験（1方向）で 204℃、長周期試験（2方向）-1 で 220℃、長周期試験（2方向）-2 で 260℃まで、それぞれ上昇した。長周期試験（2方向）-2 直後のすべり板中央部の温度は材料の軟化が始まる 260℃に辛うじて達している。PTFE 裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向があった。

(3) 多数回繰り返しに対する耐久性

長周期および限界試験を経験したすべり支承試験体は、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。今回の試験では面圧が 10N/mm² と低いことも有り、すべり面の温度上昇に伴う PTFE の軟化現象などは確認されなかった。なお、今回の試験条件では、長周期試験は地震応答波試験の 10 倍相当以上の累積吸収エネルギーを確保することを確認した。

今後の課題として、縮小試験体との比較によるスケール効果の確認、インターバルによる放熱の影響の定量化、2 方向载荷の影響の把握、これらの要因の摩擦特性モデルへの反映などがあげられる。

参考文献

2.3.1-1) 社団法人日本免震構造協会：免震部材 JSSI 規格, 2000

2.3.2 オイルダンパー

(1) はじめに

長周期地震動を想定した多数回繰り返し加振に対するエネルギー吸収性能の把握を目的に行った評価実験（第Ⅲ部 1.3.8）では、メーカーの 2000kN 動的試験機を用いて、実大の免震構造用オイルダンパーに対して、条件 2B（周期 4 秒、変位±200mm、速度±0.314m/s、累積変形 100m 相当）の多数回繰り返し加振試験を実施し、油温で 100℃まで温度上昇に伴うエネルギー吸収性能の変化が小さく、作動油の滲みだしが生じないことを確認した。しかし、試験機の制約から加振振幅が±200mm に制限され、また、正弦波 6 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（約 5 分）を設ける必要があったため、累積変形 100m の加振を行うための試験に約 90 分（6 サイクル×21 セット）の時間を要していた。

そこで、本実験では E ディフェンスの震動台を用いて、条件 3B（周期 4 秒、変位±400mm、速度±0.628m/s、累積変形 100m 相当）の加振を実施し、第Ⅲ部 1.3.8 の実験に比べて大振幅且つ短時間（約 1/3 の時間）でエネルギーを入力した場合の、エネルギー吸収性能の変化と限繰り返し状態の発生の有無を把握する。また、参考試験として、大変形・大速度加振（周期 2.5 秒、変位±600mm、速度±1.50cm/s）を実施し、エネルギー吸収性能を把握する。

試験日時：

2012 年 2 月 6 日：限界 3B（累積変形 100m）加振

2012 年 2 月 7 日：地震波加振、大変形・大速度加振

試験場所：

独立行政法人 防災科学研究所 兵庫耐震工学研究センター（E ディフェンス）

(2) 試験体

日立オートモティブシステムズ（株）製の免震構造用オイルダンパー（形式 BM250-4C 型：最大減衰力 1000kN、ストローク±700mm、速度-減衰力：バイリニア型）1 体を試験体として用いる。試験体は、第Ⅲ部 1.3.8 の加振実験でも用いた（試験体 No1）である。オイルダンパー試験体の諸元を表 2.3.2-1 に、オイルダンパーの形状及び寸法を図 2.3.2-1 に示す。

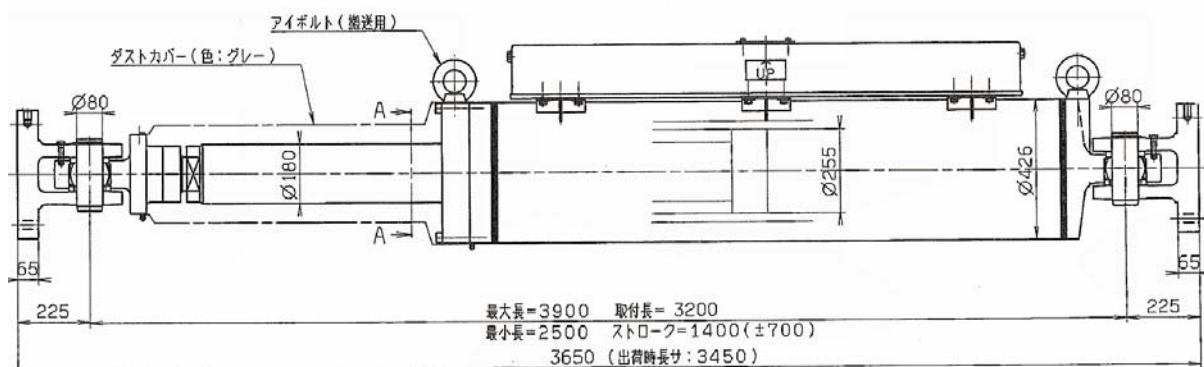


図 2.3.2-1 オイルダンパー形状寸法

表 2.3.2-1 試験体特性

		試験体 1 (大臣認定品)
オイルダンパー形式		BM250-4C
減衰力タイプ		バイリニア
1次減衰係数(C1)	MN・s/m	2.50
2次減衰係数(C2)	MN・s/m	0.1695
リリース速度	m/s	0.320
リリース減衰力	kN	800
最大速度	m/s	1.50
最大減衰力	kN	1000
ストローク	mm	±700

(3) 計測項目と計測方法

計測項目は、ダンパー減衰力、ダンパー変位、ダンパー各部の温度および室温を計測する。ダンパー減衰力は 2000kN の圧縮・引張型ロードセル（東京測器 TCLP-2MNB）で計測し、ダンパー変位は震動台のストロークを変位計で計測する。また、ダンパー各部の温度及び室温は K 型熱電対を用いて計測する。温度計測点の位置と試験体の設置状況を図 2.3.2-2、写真 2.3.2-1 および 2.3.2-2 に示す。油温は、試験体上部のリザーバタンク上面孔から熱電対をタンク内部に挿入して計測する。なお、データ収録のサンプリングは、200 回/秒（サンプリング周期 0.005 秒）とする。

計測項目

- (1) ダンパー減衰力
- (2) ダンパー変位
- (3) 温度：タンク内油温 1 箇所、本体（ベースシェル）表面 3 箇所、ベースシェル端部表面 1 箇所、ロッド端部表面 1 箇所（図 2.3.2-2 参照）
- (4) 室温（雰囲気温度）

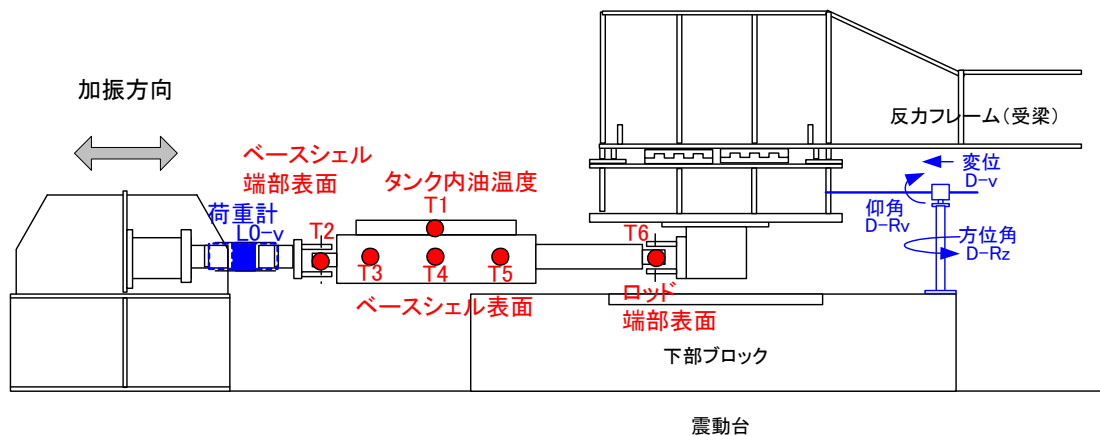


図 2.3.2-2 温度計測点の位置



写真 2.3.2-1 試験体のセット状況

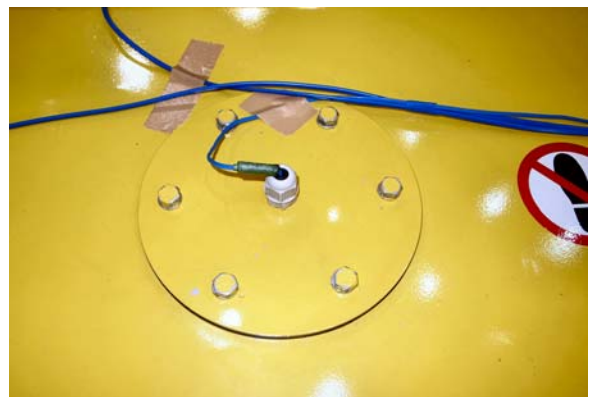


写真 2.3.2-2 油温計測用熱電対のセット状況

(4) 加振制御方法と実験ケース

試験項目は、以下に示す a)多数回繰り返し加振試験（限界 3B）、b)基本特性試験、c)地震応答波加振試験（aic003、szo024）、及び d)大変形・大速度特性試験の 4 項目である。試験条件の詳細は次頁の a)～d)に記す。試験では、①震動台を上昇させて接続ブロックのコッターを反力フレームに密着させ、②ジャッキで固定した後、③震動台を下降させオイルダンパーの水平レベルを確保し、その後、④震動台の水平 2 方向（X・Y 方向）の変位加振（同位相）により、オイルダンパーの設置軸（V 方向）に対して 1 方向の動的加振を行う。

多数回繰り返し加振試験は、震動台の連続加振能力の制約（振幅±400mm の場合で 4 サイクル）から、正弦波 4 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（所用時間約 1 分）を設けた。その結果、限界 3B 条件（累積変形 100m）の加振は、4 サイクル×16 セット（インターバル 15 回）で、試験時間は約 30 分となった。なお、震動台の加振波は、図 2.3.2-3 に示すように、1 秒間のテーパ波で変位を増加させ、所定の変位振幅で 4 サイクルの加振を行い、1 秒間のテーパ波で変位を減少させて停止する波形とする。テーパ部を含む累積変形量は 115.2m である。また、多数回繰り返し加振試験の前後と冷却後に基本特性試験を実施し、初期性能に対する最大減衰力およびエネルギー吸収量の変化状況を確認する。

また、大変形・大速度特性試験では、最大変位±600mm、最大速度±1.50m/s の正弦波 2 サイクルの加振を実施し、大変形・大速度加振時のオイルダンパーのエネルギー吸収性能を把握する。なお、第Ⅲ部 1.3.8 のメーカー試験機による試験は、加振力の制約から、本体側を固定し、ロッド側を駆動させる方法で行ったが、E ディフェンスでは、免震建築物でのダンパー設置状態により近づけるため、ロッド側を固定し、本体側を震動台で駆動させる方法（本体側オイルに慣性力が作用する状態）としている。ダンパーは、高温用断熱板（t = 10mm，日本 D.M.E 製）を介して試験機に取り付ける。表 2.3.2-2 に試験ケース一覧を示す。

試験項目

- a) 限界加振（±400mm、±0.628m/s、累積変形 100m）による多数回繰り返し加振試験
- b) 基本特性試験（±159mm、±0.25m/s） （限界 3B）
- c) 大変形・大速度特性試験（±600mm、±1.5m/s）
- d) 地震応答波加振試験（aic003、szo024）

表 2.3.2-2 試験ケース一覧

試験項目	周期 (s)	変位 (mm)	速度 (cm/s)	サイクル (回)	インターバル (回)	備考
(前)基本特性	4	159	25	2	-	常温時の基本特性
限界(3B)	4	400	62.8	64	15	多数回繰り返し(累積変形100m)
(直後)基本特性1	4	159	25	2	-	温度上昇後の基本特性
冷却						
(冷却後)基本特性	4	159	25	2	-	冷却後の基本特性
応答波加振	-	107	25.7	-	-	AIC003(東海・東南海・南海)
	-	188	45.5	-	-	SZO024(東海・東南海・南海)
大変形・大速度 特性試験	2.5	300	75	2	-	大変形大速度加振時の特性
	2.5	400	100	2	-	
	2.5	500	125	2	-	
	2.5	600	150	2	-	
(直後)基本特性2	4	159	25	2	-	大変形大速度加振後の基本特性

a) 限界加振条件（限界 3B）による多数回繰り返し加振の試験方法

表 2.3.2-3 に示す限界加振条件でオイルダンパーを加振し、油温温度と最大減衰力、吸収エネルギー、履歴ループの関係を求める。図 2.3.2-3 に加振波形 1 セット分を示す。

表 2.3.2-3 限界加振条件 [3B]

加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)	加振サイクル (回)	インターバル (回)	累積変形 (m)	吸収エネルギー (kN・m)	温度上昇予想値 (°C)
正弦波	4.0	40.0	62.8	852.3	64	15	102.4	81478	98

注) 累積変形、計画エネルギーは加振波形のうち、図 2.3.2-3 に示す評価区間部分の合計を表す。テーパー分を含む累積変形量は 115.2m である。

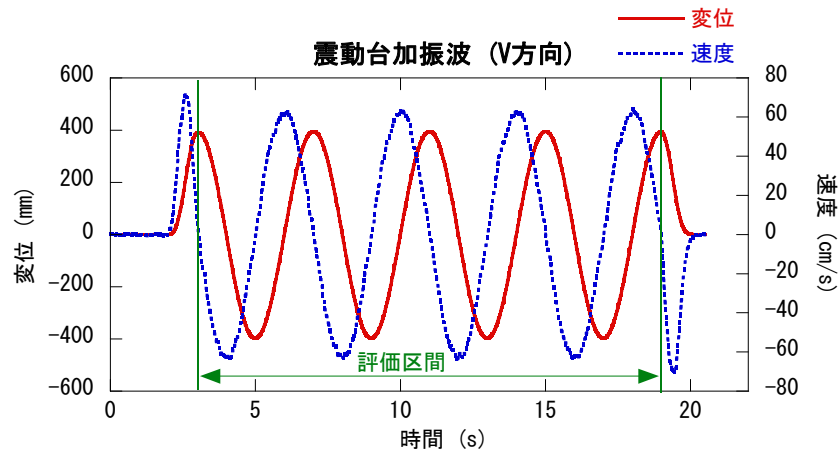


図 2.3.2-3 震動台の正弦波加振波形（多数回繰り返し試験[3B]の場合）

b) 基本特性試験の試験方法

表 2.3.2-4 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、最大減衰力、吸収エネルギー量および履歴ループを求める。図 2.3.2-4 に加振波形を示す。

表 2.3.2-4 基本性能試験の加振条件

加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	サイクル数 (回)	速度 (cm/s)	減衰力規格±15% (kN)
正弦波	4.0	15.9	2	25.0	625.0±93.8

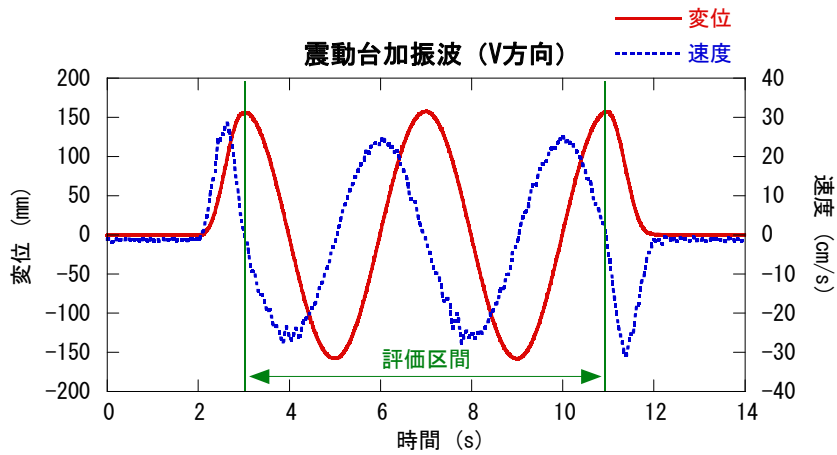


図 2.3.2-4 震動台の正弦波加振波形 (基本特性試験の場合)

c) 大変形・大速度特性試験の試験方法

表 2.3.2-5 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、最大減衰力、吸収エネルギー量および履歴ループを求める。図 2.3.2-5 に加振波形を示す。

表 2.3.2-5 大変形・大速度特性試験の加振条件

加振波形	周期 (s)	変位 (mm)	サイクル数 (回)	速度 (cm/s)	減衰力規格±15% (kN)
正弦波	2.5	300	2	75.0	872.9±130.9
		400		100.0	915.3±137.3
		500		125.0	957.6±143.6
		600		150.0	1000.0±150.0

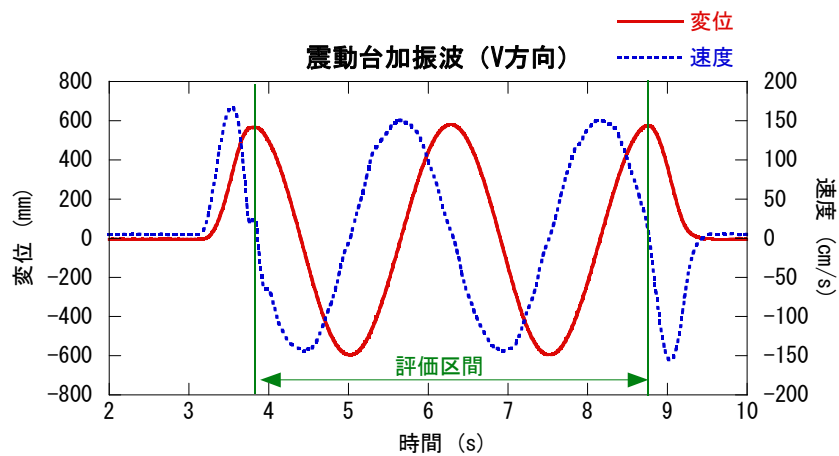


図 2.3.2-5 震動台の正弦波加振波形 (大変形・大速度特性試験の場合)

d) 地震応答波加振試験の試験方法

表 2.3.2-6 に示す加振条件の地震応答波でオイルダンパーを加振した際の減衰力、吸収エネルギーを計測する。地震応答波は、東海・東南海・南海地震が連続して発生すると想定して作成した愛知県津島市の地震動（平均：AIC003-av）と静岡県浜松市の地震動（平均：SZO024-av）による、1 質点系地震応答解析から得られた変位応答波を入力する。なお、免震建築物の条件としては、固有周期 4 秒の天然ゴム支承＋高摩擦すべり支承の複合免震建築物を想定した。モデル重量に対する滑り荷重の比率は 0.04 である。図 2.3.2-6 及び図 2.3.2-7 に変位応答波形を示す。

表 2.3.2-6 地震応答波試験の加振条件

加振波形	地震応答波名	変位(mm)	速度(cm/s)	継続時間(s)
地震応答波	AIC003（津島）	106.9	25.7	325.0
	SZO024（浜松）	188.4	45.5	325.0

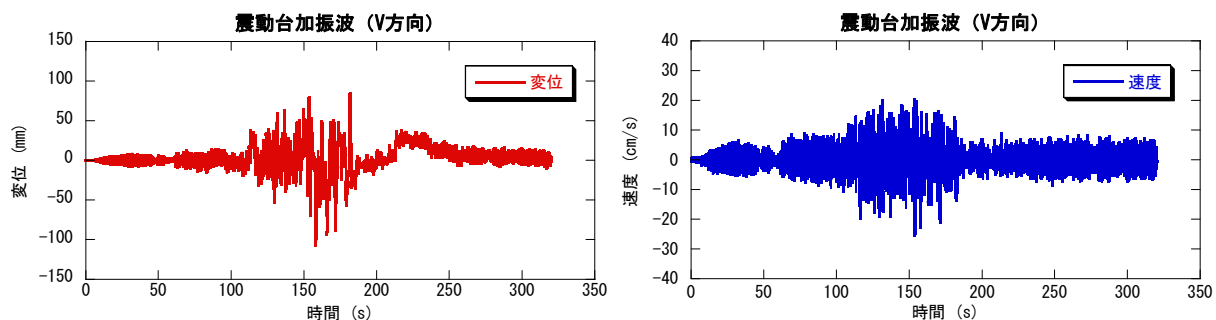


図 2.3.2-6 震動台の地震応答波加振波形（AIC003-av）

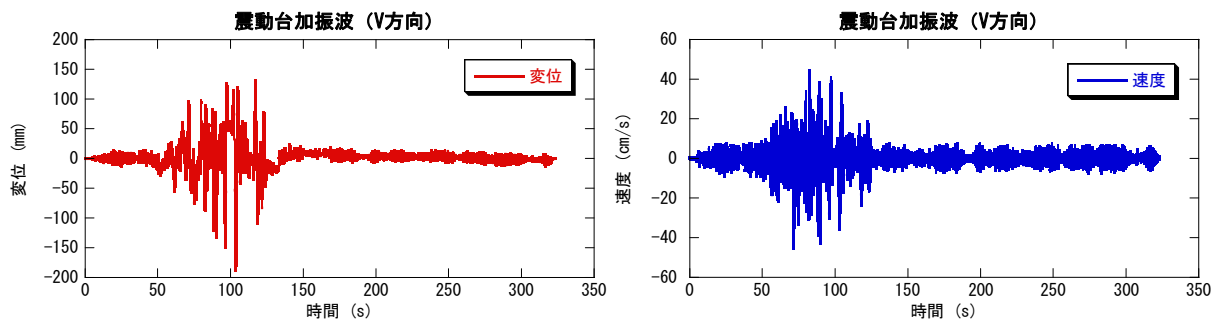


図 2.3.2-7 震動台の地震応答波加振波形（SZO024-av）

(5) 実験結果

a) 限界加振条件[3B]における履歴曲線、温度時歴とエネルギー吸収性能の関係

図 2.3.2-8 に表 2.3.2-3 の条件で加振した 4 波×16 セットの減衰力-変位曲線を重ねて示す。図 2.3.2-9 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 2.3.2-7 に各加振セットにおける吸収エネルギー、最大減衰力、油温上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた油温上昇予想値を示す。また、図 2.3.2-10 に限界加振試験後の温度推移の時刻歴を示す。

油温は 93.6°C 上昇して 108.2°C となったが、履歴曲線の変化は小さく、エネルギー吸収量の低下率は 5% 程度、最大減衰力の低下率も 4% 程度であった。また、本体（ベースシェル）表面温度も、ロッド側の測点（T5）で 102.1°C となったが、油漏れは生じなかった。本体表面からの空気中への放熱量は少なく、入力エネルギーの大半が油温の温度上昇に反映されているため、累積吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量で除した油温上昇量の予測（放熱無し）でも実験結果と良い対応が得られている。なお、加振後、油温が 30°C 以下まで低下するのに、約 12 時間の時間を要した。

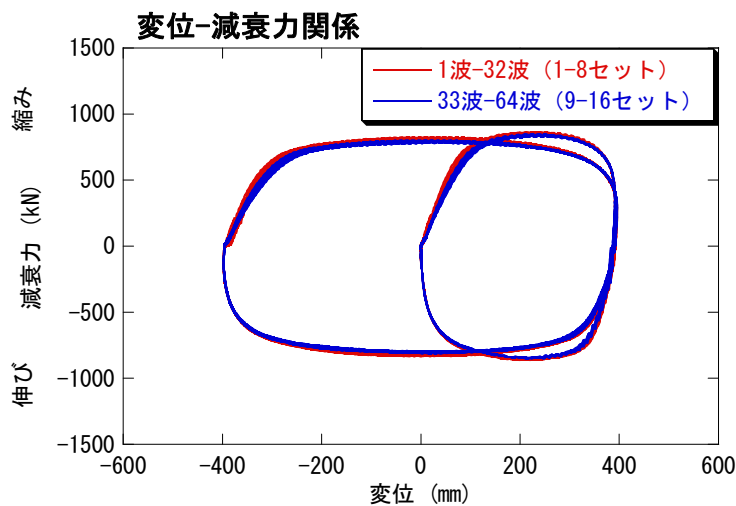


図 2.3.2-8 減衰力-変位曲線（4 波×16 セット）

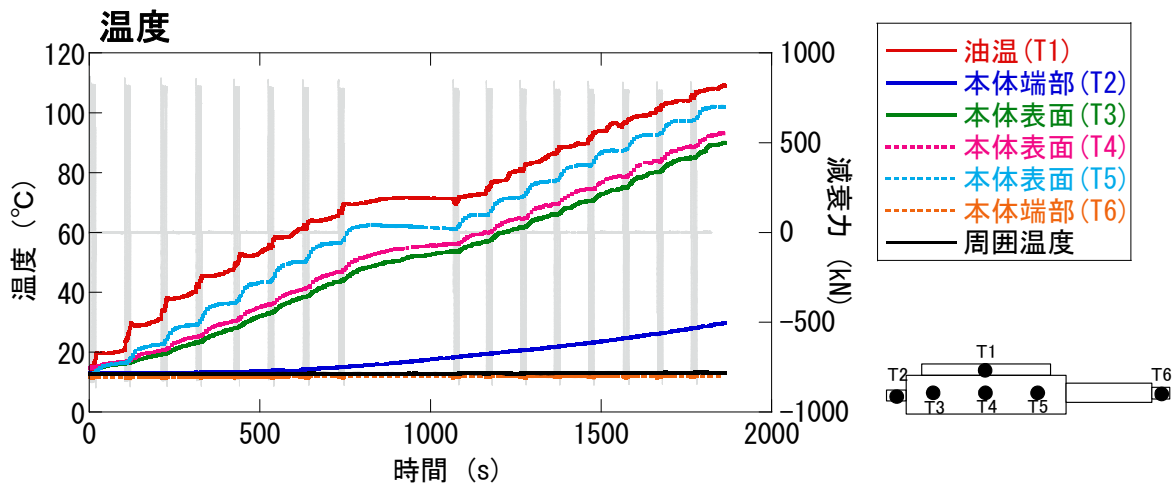


図 2.3.2-9 各部温度の時刻歴波形

表 2.3.2-7 各セットにおける吸収エネルギー、最大減衰力の推移と温度上昇量

セット	累積変形 (m)	吸収エネルギー (kN-m=kJ) *1		最大減衰力 (kN)			油温上昇量 (°C)		
		累積	個別 (低下率)	圧縮側 (低下率)	伸長側 (低下率)	試験値	予測値*2 放熱無し	予測値 放熱考慮	
1	7.2	5154	5154 (1.00)	824.4 (1.00)	-832.3 (1.00)	6.0	6.2	6.0	
2	14.4	10276	5122 (0.99)	819.1 (0.99)	-826.7 (0.99)	16.6	12.4	12.0	
3	21.6	15385	5109 (0.99)	816.0 (0.99)	-823.1 (0.99)	25.7	18.5	17.9	
4	28.8	20478	5093 (0.99)	815.2 (0.99)	-819.4 (0.98)	32.9	24.6	23.8	
5	36.0	25555	5077 (0.99)	810.8 (0.98)	-816.9 (0.98)	40.0	30.7	29.7	
6	43.2	30616	5060 (0.98)	807.2 (0.98)	-815.6 (0.98)	46.6	36.8	35.5	
7	50.4	35656	5040 (0.98)	804.1 (0.98)	-810.8 (0.97)	50.9	42.9	41.3	
8	57.6	40683	5028 (0.98)	802.2 (0.97)	-810.2 (0.97)	56.7	48.9	47.1	
9	64.8	45709	5026 (0.98)	800.3 (0.97)	-810.1 (0.97)	58.6	54.9	52.8	
10	72.0	50709	5001 (0.97)	797.3 (0.97)	-807.5 (0.97)	66.2	60.9	58.5	
11	79.2	55697	4988 (0.97)	796.5 (0.97)	-806.8 (0.97)	71.4	66.9	64.2	
12	86.4	60668	4971 (0.96)	795.5 (0.96)	-806.8 (0.97)	75.2	72.9	69.8	
13	93.6	65631	4963 (0.96)	795.1 (0.96)	-805.9 (0.97)	80.9	78.9	75.1	
14	100.8	70575	4944 (0.96)	792.9 (0.96)	-804.7 (0.97)	85.7	84.8	81.0	
15	108.0	75509	4934 (0.96)	791.3 (0.96)	-801.3 (0.96)	89.6	90.8	86.5	
16	115.2	80428	4919 (0.95)	789.4 (0.96)	-799.6 (0.96)	93.6	96.7	92.0	

*1 吸収エネルギーは、テーパー部を含めて算出した数値である

*2 油温上昇の予測値は、吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量832kJ/°Cで除した数値である

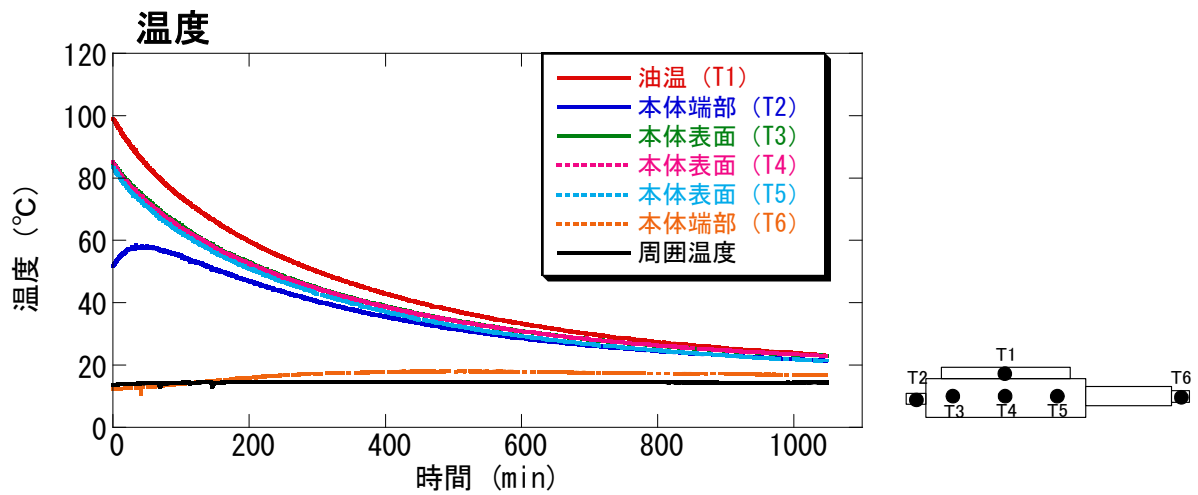


図 2.3.2-10 加振後の温度の降下推移 (限界試験 3B 後)

b) 限界加振試験[3B]、大変形・大速度試験前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した（前基本特性試験）と、限界試験直後の高温状態で実施した（直後基本特性試験 1）と、冷却後の常温状態で実施した（冷却後基本特性試験）の結果を比較して以下に示す。また、大変形・大速度加振試験直後に実施した（直後基本特性試験 2）の結果についても示す。図 2.3.2-11 に所定振幅 2 ループ目の減衰力-変位曲線を比較して示す。また、表 2.3.2-8 に所定振幅 2 ループ目の減衰力-変位曲線を用いて評価した、吸収エネルギーおよび最大減衰力を比較して示す。

限界試験直後の高温状態（油温約 110℃）における基本特性の変化は小さく、常温下（油温約 12℃）の初期状態に対する吸収エネルギーの低下率は約 6%、最大減衰力の低下率は約 3%であった。冷却後は、吸収エネルギーと最大減衰力ともに、ほぼ初期状態に復帰した。また、大変形・大速度試験直後（油温約 49℃）における基本特性の変化は、多数回繰り返しの限界試験による低下率に比べて、小さな値であった。

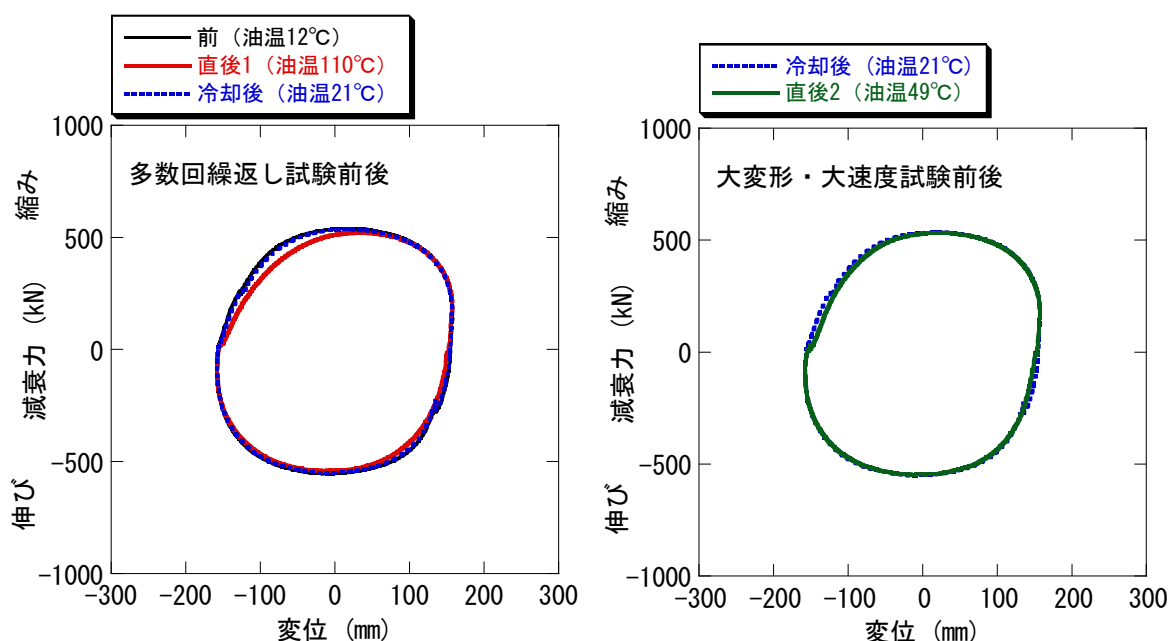


図 2.3.2-11 基本特性試験の減衰力-変位曲線の比較

表 2.3.2-8 限界加振試験、大変形・大速度試験前後の吸収エネルギー、最大減衰力の比較

加振ケース	油温 (°C)	吸収エネルギー (kJ)		最大減衰力 (kN)		
			(低下率)	圧縮側	(低下率)	伸長側 (低下率)
(前) 基本特性	12.3	286.3	(1.00)	540.9	(1.00)	-556.5 (1.00)
多数回繰り返し加振試験 (限界3B)						
(直後) 基本特性1	110.0	268.5	(0.94)	522.4	(0.97)	-541.9 (0.97)
冷却						
(冷却後) 基本特性	20.7	281.5	(0.98)	536.6	(0.99)	-552.7 (0.99)
大変形・大速度加振試験						
(直後) 基本特性2	49.3	275.2	(0.96)	534.1	(0.99)	-547.1 (0.98)

注1) 吸収エネルギーと最大減衰力は、所定振幅2ループ目の履歴ループから算出した数値である

注2) 低下率は、(前)基本特性の値に対する比として定義する

c) 大変形・大速度特性試験結果

図 2.3.2-12 に各加振速度における減衰力-変位曲線の 1 波目と 2 波目を重ねて示す。表 2.3.2-9 に吸収エネルギー、最大減衰力および、圧縮側減衰力に生じる立ち上り遅れの量（無効ストローク量）を、1 波目と 2 波目で比較して示す。また、図 2.3.2-13 に試験結果の最大減衰力を速度-減衰力の規格値と比較して示す。なお、図中には、事前に実施した工場試験（ロッド側加振）の結果も合わせて示している。本試験では、加振中にロードセル取り付けねじの回転に起因して、加振終了後にダンパー本体が約 17.6° 傾いていた。写真 2.3.2-3 および写真 2.3.2-4 に傾きの状況を示す。

各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られているが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生している。無効ストロークの量は、75cm/s 加振時は約 10mm、100cm/s 加振時は約 20mm、125cm/s 加振時は約 70mm、150cm/s 加振時は約 200mm であり、加振速度が大きくなるにつれて無効ストロークの量が大きくなっている。2 波目の圧縮側には減衰力の立ち上がり遅れがあるものの、最大減衰力は 1 波目と比べてほとんど変化が見られなかった。また、1 波目に対する吸収エネルギー量の低下率も、75cm/s および 100cm/s 加振時は約 1%、125cm/s 加振時も約 2%と小さく、150cm/s 加振時も約 8%の低下率であった。2 波目の伸長側に無効ストロークが見られないこと、また、数分のインターバルを設けて実施した次の加振の 1 波目では、正常な減衰力-変位特性が得られることから、リザーバータンク内の空気が作動油へ混入した可能性は低く、また、調圧弁・リリース弁の作動遅れの可能性も低い。

今回の加振実験においては、ダンパー本体側を加振したため、ダンパー本体に繰り返しの慣性力が作用することにより、2 波目のロッド伸長時にリザーバータンク室側から内シリンダー側への作動油の吸い込み不足が発生し、これに起因して圧縮側の減衰力の立ち上がりに遅れが発生した可能性が挙げられる。

なお、最大減衰力は、速度 150cm/s において、規格値よりもやや大きくなるが、他の速度では規格値内であった。

表 2.3.2-9 吸収エネルギー、最大減衰力および無効ストローク量の比較

速度 (cm/s)	変位 (mm)	加速度 (Gal)	サイクル	油温 (°C)	吸収エネルギー(kJ)		最大減衰力(kN)			圧縮側の立ち上り遅れ 無効ストローク(mm)	
					(低下率)	圧縮側 (低下率)	伸長側 (低下率)				
75	300	189	1波目	26.2	884	(1.00)	862.3	(1.00)	-870.8	(1.00)	無し
			2波目	26.2	877	(0.99)	862.7	(1.00)	-869.8	(1.00)	10
100	400	253	1波目	30.8	1324	(1.00)	974.0	(1.00)	-978.2	(1.00)	無し
			2波目	30.8	1315	(0.99)	972.5	(1.00)	-974.5	(1.00)	20
125	500	316	1波目	35.8	1829	(1.00)	1085.9	(1.00)	-1091.4	(1.00)	無し
			2波目	35.8	1786	(0.98)	1083.8	(1.00)	-1086.0	(1.00)	70
150	600	379	1波目	49.3	2424	(1.00)	1217.2	(1.00)	-1230.1	(1.00)	無し
			2波目	49.3	2229	(0.92)	1210.6	(0.99)	-1222.0	(0.99)	200

注) 低下率は、1波目の値に対する比として定義する

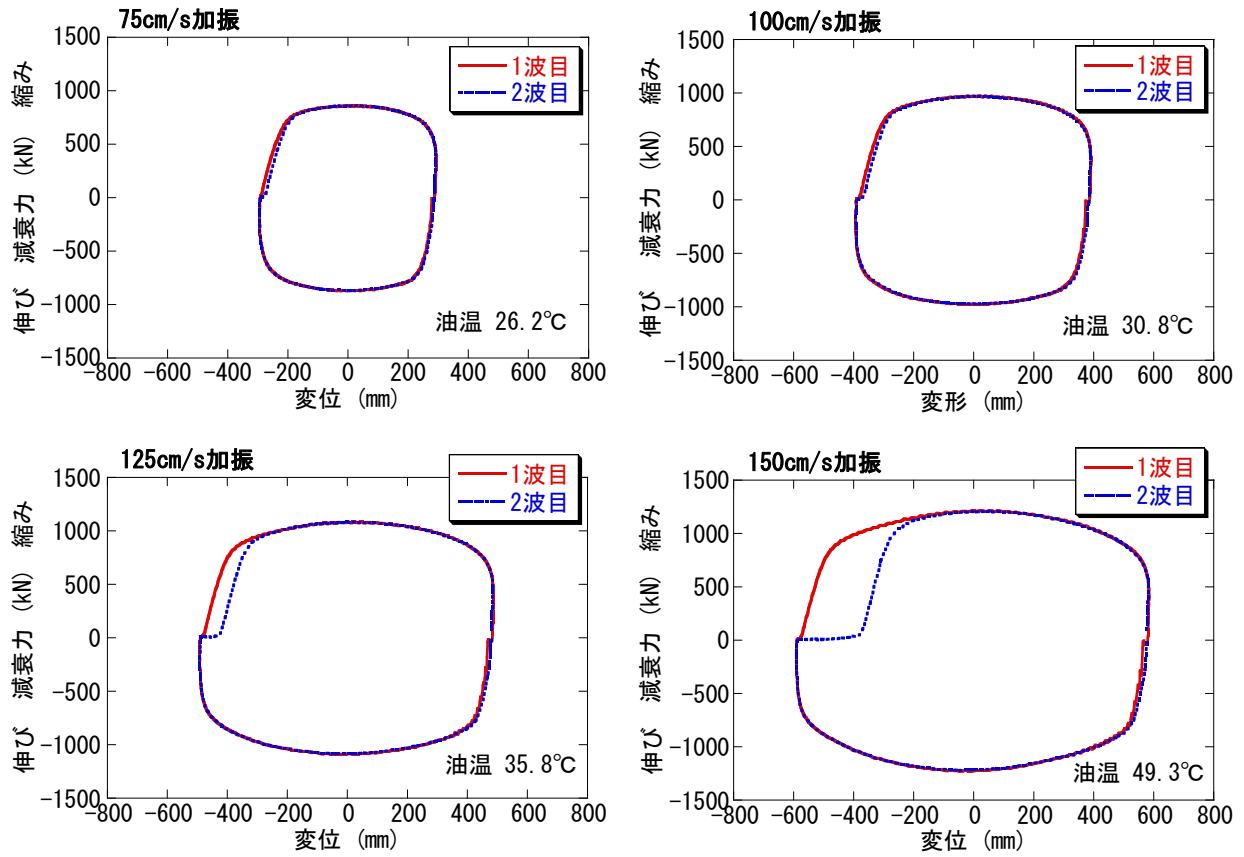


図 2.3.2-12 大変位・大速度特性試験時の減衰力-変位曲線 (1波目と2波目の比較)

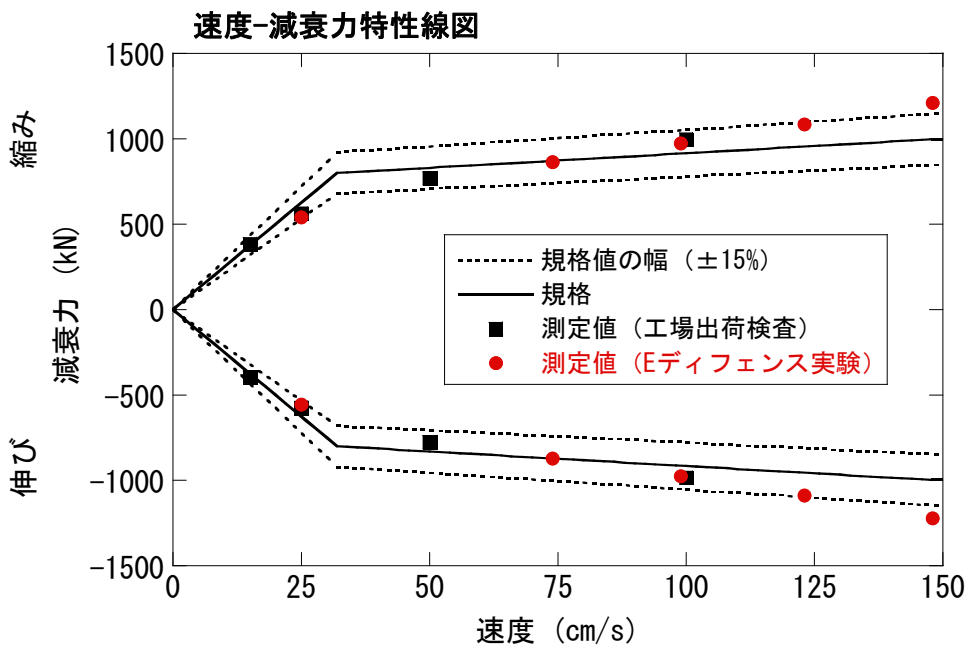


図 2.3.2-13 速度-減衰力関係の規格値との比較



写真 2.3.2-3 ダンパー傾きの状況



写真 2.3.2-4 ロードセル取り付けネジの回転

d) 地震応答波加振結果

図 2.3.2-14 および図 2.3.2-15 に地震応答波（AIC003-av）加振時の減衰力－変位曲線と、減衰力、吸収エネルギーおよび、温度の時刻歴波形を示す。

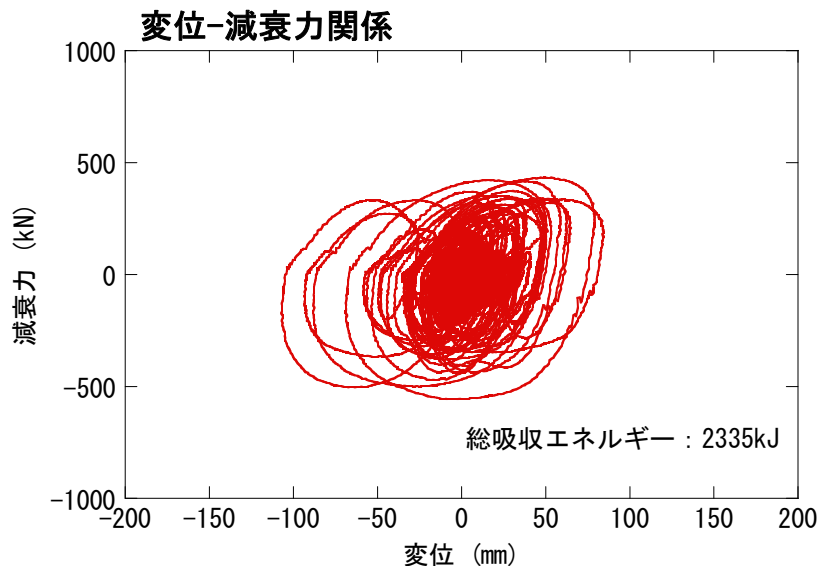


図 2.3.2-14 減衰力－変位曲線（地震応答波 AIC003-av）

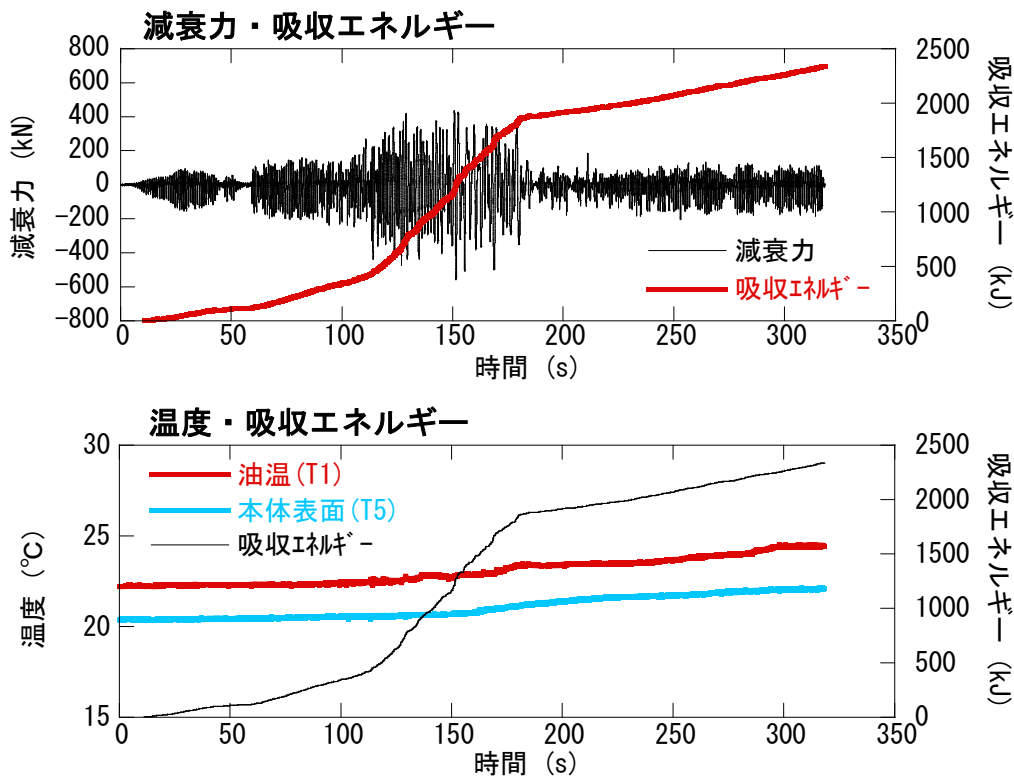


図 2.3.2-15 減衰力、吸収エネルギー、温度上昇の時刻歴波形（地震応答波 AIC003-av）

図 2.3.2-16 および図 2.3.2-17 に地震応答波 (SZO029-av) 加振時の減衰力-変位曲線と、減衰力、吸収エネルギーおよび、温度の時刻歴波形を示す。

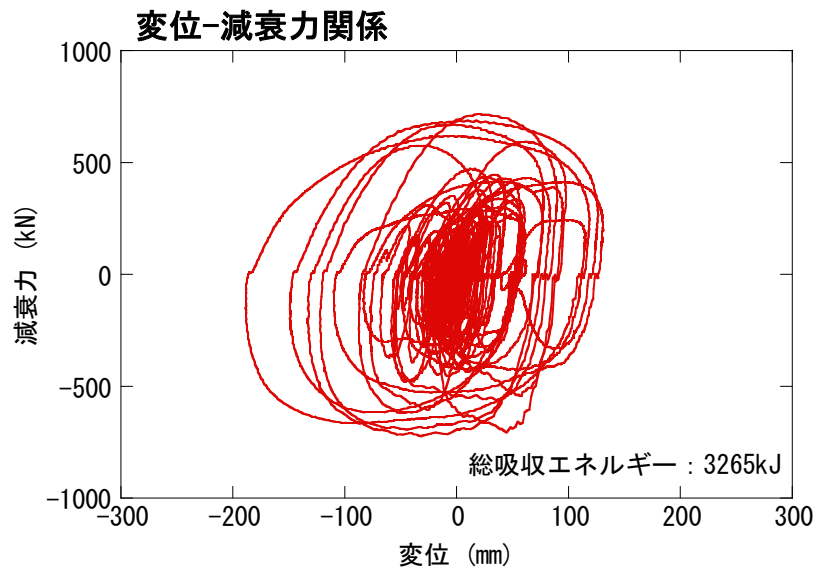


図 2.3.2-16 減衰力-変位曲線 (地震応答波 SZO029-av)

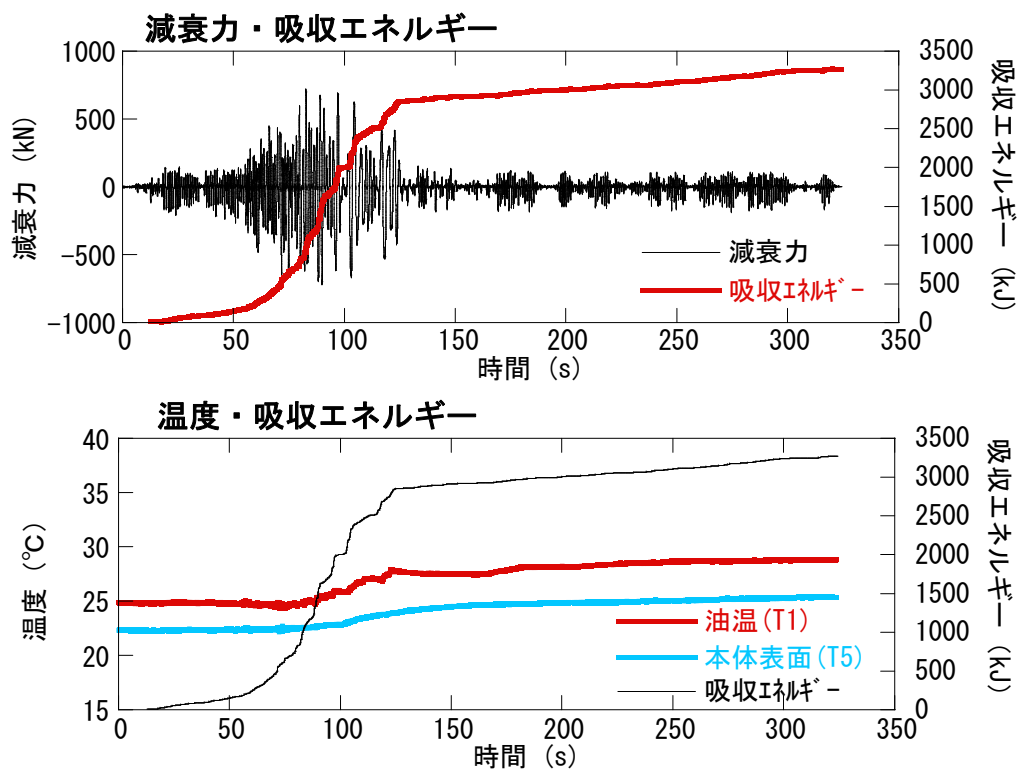


図 2.3.2-17 減衰力、吸収エネルギー、温度上昇の時刻歴波形 (地震応答波 SZO029-av)

(6) まとめ

① 多数回繰り返し特性

図 2.3.2-18 に多数回繰り返し試験 (3B) の結果について、加振時間と累積吸収エネルギー (加振前後のテーパを含む) および油温上昇量の関係を、第Ⅲ部 1.3.8 の試験結果 (2A、2B) と比較して示す。また、図 2.3.2-19 に累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係をまとめて示す。また、図 2.3.2-20 および図 2.3.2-21 に油温と最大減衰力・吸収エネルギーの低下率の関係をまとめて示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

- ・本試験 (3B) は、メーカー試験機を用いた第Ⅲ部 1.3.8 の試験 (2A、2B) の約 1/3 の加振時間で、目標とする累積変形量の加振が実施できた。
- ・限界加振条件 3B (所定振幅加振部分の累積変形量が約 100m、テーパ部を含む累積変形量が約 115.2m) の加振による油温上昇量は 93.6°C (油温 14.6°C→108.2°C) であった。本体 (ベースシェル) 表面温度も、ロッド側の測点 (T5) で 102.1°C となったが、履歴性状の変化は小さく、また、シール部から作動油のしみだしは見られなかった。
- ・試験体表面からの空気中への放熱量は少なく、入力エネルギーの大半が油温の温度上昇に反映されているため、累積吸収エネルギー量と油温上昇量の相関は高い。累積吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量で除した油温上昇量の予測 (放熱無し) でも実験結果と良い対応が得られた。なお、インターバルによる放熱の影響を評価するため、放熱を考慮した油温上昇量の予測値と放熱無しの予測値を比較したところ、加振 30 分間の本実験の放熱量は 4.7°C であり、第Ⅲ部 1.3.8 の加振 90 分間の放熱量の 11.5°C に比べて小さいことがわかる。
- ・多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られる。常温 (20°C) に対する最大減衰力の低下率は、油温 (108°C) においても伸び側・縮み側共に約 4% であった。また、エネルギー吸収量の低下率は、油温 (108°C) においても約 5% の低下であった。

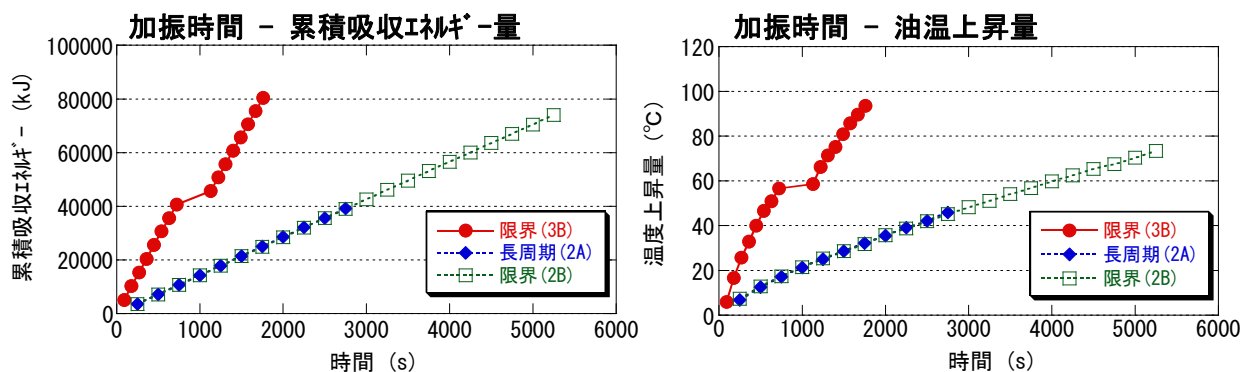


図 2.3.2-18 多数回繰り返し試験結果 (加振時間と累積吸収エネルギー及び油温上昇量の関係)

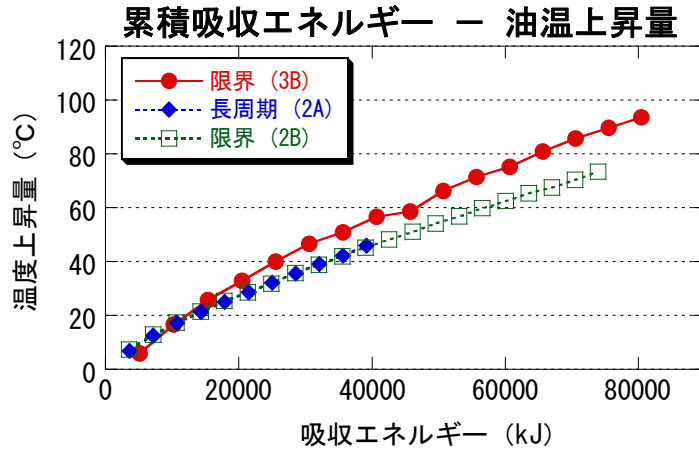


図 2.3.2-19 多数回繰り返し試験結果（累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係）

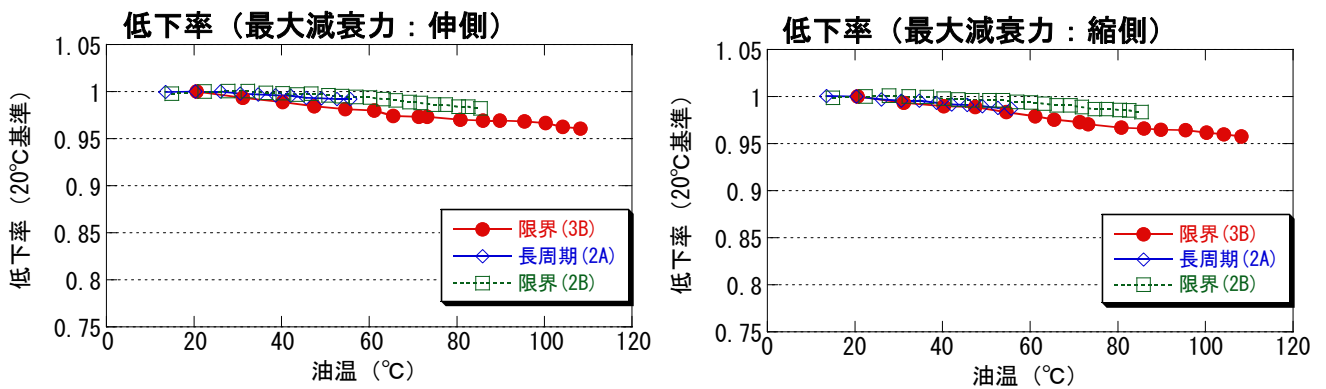


図 2.3.2-20 多数回繰り返し試験結果（油温と最大減衰力の低下率の関係）

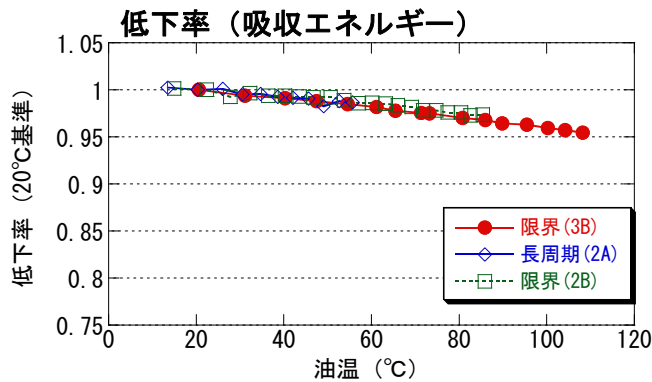


図 2.3.2-21 多数回繰り返し試験結果（油温と吸収エネルギーの低下率の関係）

②多数回繰り返し前後の基本特性の変化および大変形・大速度特性

図 2.3.2-22 に多数回繰り返し試験結果前後および冷却後に実施した基本特性試験について、初期特性に対する最大減衰力および吸収エネルギーの変化率をまとめて示す。また、加振 2 波目において圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した大変形・大速度特性試験について、最大減衰力および吸収エネルギーの 1 波目に対する 2 波目の低下率を図 2.3.2-23 にまとめて示す。図 2.3.2-24 に試験結果の最大減衰力を速度-減衰力の規格値と比較して示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

- ・多数繰り返し加振直後の高温状態（油温約 110℃）における基本特性の変化は小さく、常温化（油温約 12℃）の初期状態に比べ、吸収エネルギーは約 6%、最大減衰力は約 3%の低下率であった。また、油温が常温状態に戻ると、基本特性は、ほぼ初期状態に復元した。
- ・大変形・大速度試験では、各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られたが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。無効ストローク量は、75cm/s 時は約 10mm、100cm/s 時は約 20mm、125cm/s 時は約 70mm、150cm/s 時は約 200mm であり、加振速度が大きくなるにつれて無効ストロークの量が大きくなった。
- ・2 波目の圧縮側には減衰力の立ち上がり遅れがあるものの、最大減衰力は 1 波目とほぼ同じ値であった。一方、吸収エネルギー量は、75cm/s および 100cm/s 時は約 1%、125cm/s 時は約 2%、150cm/s 時は約 8%の低下率であった。減衰力の立ち上がり遅れが発生しても、数分のインターバルを設けて実施した次の加振の 1 波目では、正常な減衰力-変位特性が得られた。
- ・最大減衰力は、速度 150cm/s において、規格値よりもやや大きくなるが、他の速度では規格値内であった。

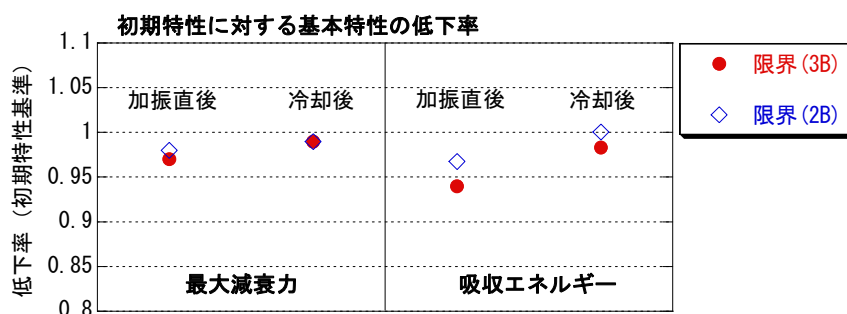


図 2.3.2-22 多数回加振後および冷却後の初期特性に対する基本特性の変動

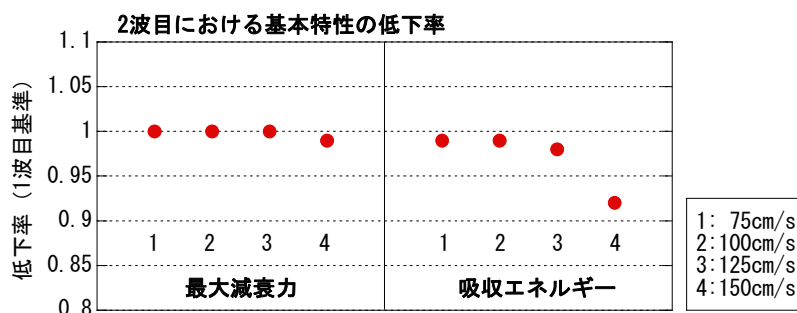


図 2.3.2-23 履歴 2 波目における基本特性の変化率（大変形・大速度試験）

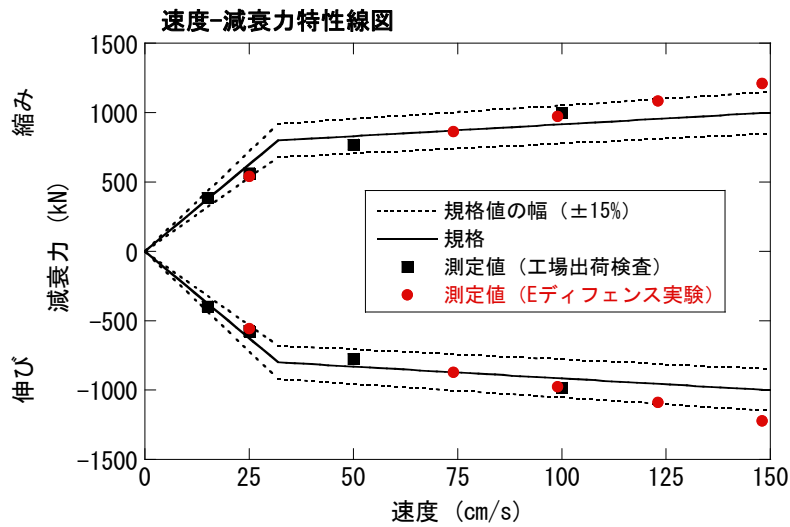


図 2.3.2-24 速度-減衰力関係の規格値との比較

③今後の課題

多数回繰り返し（限界）試験については、オイルシールとしてフッ素系樹脂よりも限界温度が低いニトリルゴムを用いたダンパーについても、試験を実施するのが望ましい。

大変形・大速度試験については、2 波目の圧縮側で減衰力に立ち上がり遅れ（無効ストローク）が発生した。2 波目の伸長側に無効ストロークが見られないこと、また、数分のインターバルを設けて実施した次の加振の 1 波目では、正常な減衰力-変位特性が得られることから、リザーバータンク内の空気が作動油へ混入した可能性は低く、また、調圧弁・リリース弁の作動遅れの可能性も低い。よって、圧縮側減衰力の立ち上がり遅れが発生した原因としては、ダンパー本体側を加振したことによって、リザーバータンク内の作動油に繰り返しの慣性力が作用し、2 波目のロッド伸長時にリザーバータンク室側から内シリンダー側への作動油の吸い込み不足が発生した可能性が挙げられる。しかし、本実大試験体については、試験機の加振能力の制約により、メーカー試験機でのロッド側加振による比較データ（大変形・大速度データ）がないため、推論の域をでない。以上より、メーカーの試験機で、縮小試験体によるロッド側加振および本体側加振の比較実験を実施し、リザーバータンク内の作動油に慣性力が作用した場合の影響を把握する必要がある。また、他のメーカーの実大オイルダンパーについても、同様の大変形・大速度加振を実施することが望ましい。

2.3.3 天然ゴム系積層ゴム（静加力試験）

(1) はじめに

天然ゴム系積層ゴムの実大試験体（φ1000）については、E-ディフェンスでの実験を予定し試験体を製作したが、震動台の制御上の理由により同施設での実施が困難であることが判明したため、これに変えてメーカーの試験機で静的条件で多数回繰返し試験を行うこととした。試験の概要は以下のとおりである。

試験日時：

2012年3月1日：長周期（累積変形 50m）、限界（累積変形 100m）加振

試験場所：

（株）ブリヂストン 横浜工場 2MN 出庫試験機

鉛直最大 2MN、最大速度 7mm/s、ストローク ±500mm

(2) 試験体

支承は外径φ1000（ゴム種 G4、ブリヂストン製）の実大試験体。ゴム層厚は 6.7mm、ゴム層数は 30 層、内部鋼板厚は 4.4mm、S1=37.3、S2=5.0、基準面圧は 15N/mm² である。

試験体の外観図を図 2.3.3-1 に示す。

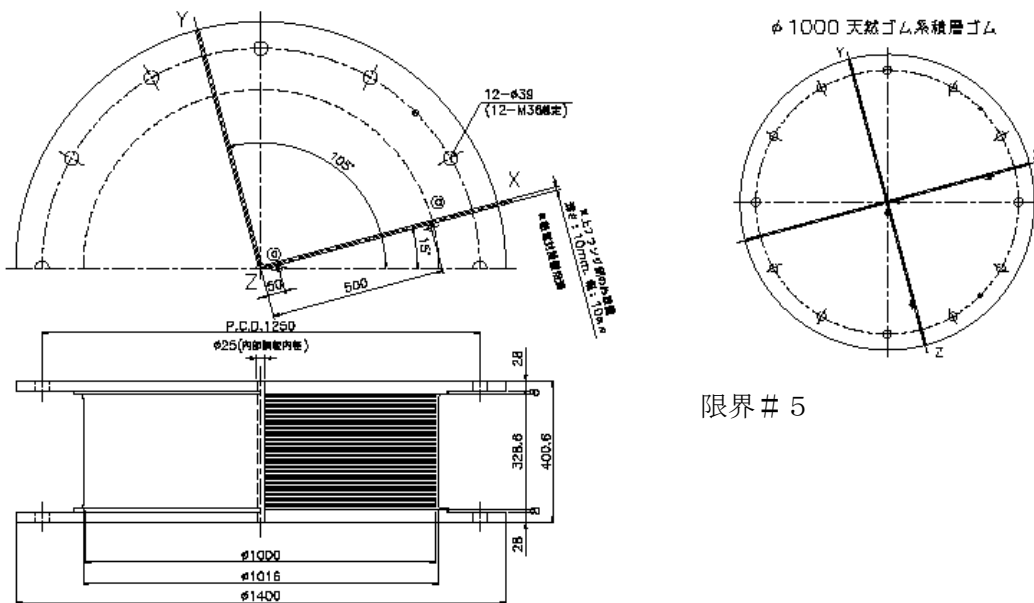


図 2.3.3-1 試験体外観（天然ゴム系積層ゴム支承）

(3) 計測項目

計測項目は、試験機の測定装置による水平変位、水平荷重、鉛直荷重、温度（試験体内部・表面、室温）とした。

温度計測は、ゴム内部および上フランジ下面に計7点の熱電対と、外気温計測用に外部に1点の熱電対を設置した。

温度計測点を図 2.3.3-2 に示す。

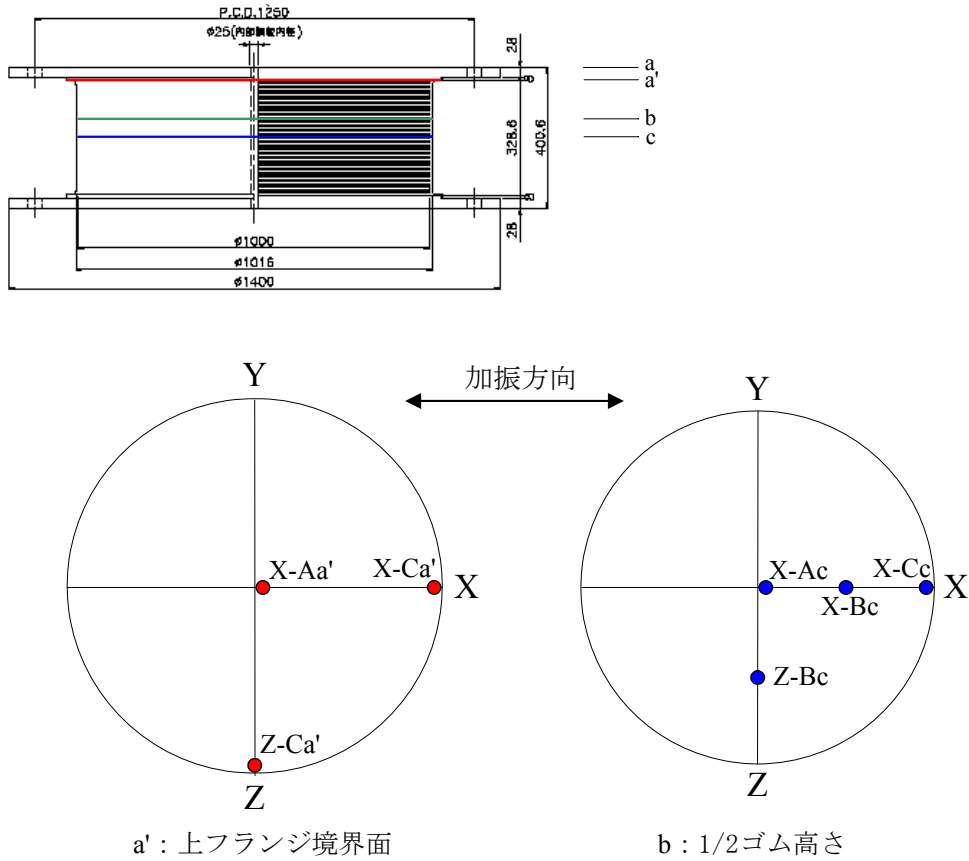


図 2.3.3-2 温度計測点

(4) 実験ケース

実験ケース一覧を表 2.3.3-1 に示す。加振波には三角波を用い、基本特性試験は振幅 201mm、速度 6.67mm/s (周期 120.5 秒)、長周期および限界特性試験は振幅 402mm、速度 6.67mm/s (周期 241 秒) の条件とした。長周期および限界特性試験は、10 サイクルを 1 セットとし、セット間に油温低下のためのインターバル時間をとった。

表 2.3.3-1 実験ケース一覧

ケース	セット	サイクル数	変位 ±mm	速度 cm/s	加振 周期 s	時間 s	累積 変形 m
基本特性		3	201	6.67	120.5	362	2.4
長周期	#1	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#2	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#3	12	402	6.67	241	2892	19.3
	計	32					51.5
直後基本特性(1)		3	201	6.67	120.5	362	2.4
限界	#1	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#2	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#3	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#4	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#5	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#6	10	402	6.67	241	2411	16.1
	#7	4	402	6.67	241	964	6.4
	計	64					102.9
直後基本特性(2)		3	201	6.67	120.5	362	2.4

(5) 実験結果

1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、等価粘性減衰定数は以下の方法により求める。評価方法は、参考文献^{2.3.3-1)}をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として載荷3サイクルめの荷重-変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各載荷ケースでサイクル毎の荷重-変形関係特性値を読み取ることとする。

(a) 水平剛性

荷重-変形関係において、原点と最大荷重点を結ぶ直線の勾配の正負平均値を水平剛性 K_h とする (図 2.3.3-3,式(2.3.3-1))。

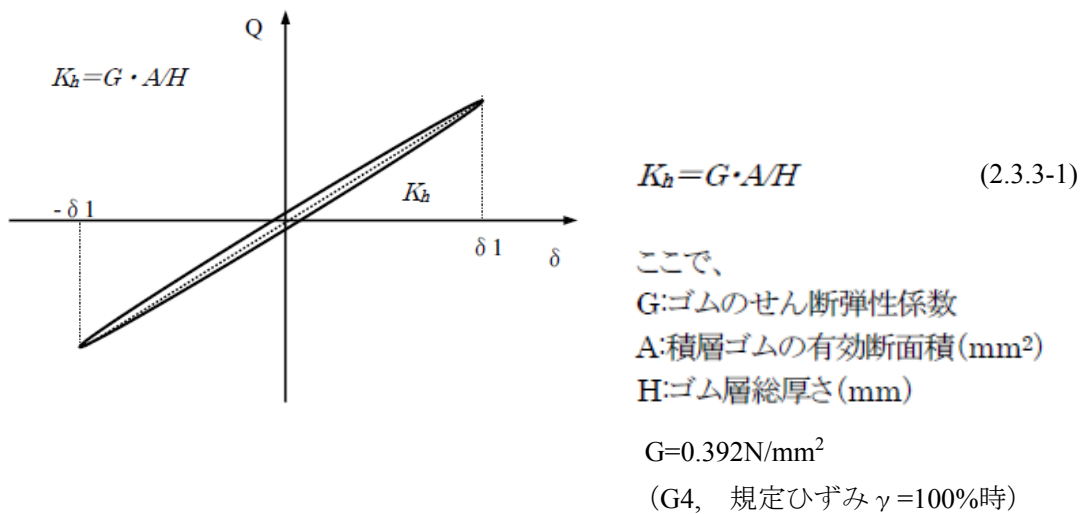


図 2.3.3-3 水平剛性 K_h の算出方法

(b) 減衰特性値

履歴の面積と前述の水平剛性 K_h から等価粘性減衰定数 h_{eq} を求める (図 2.3.3-4)。

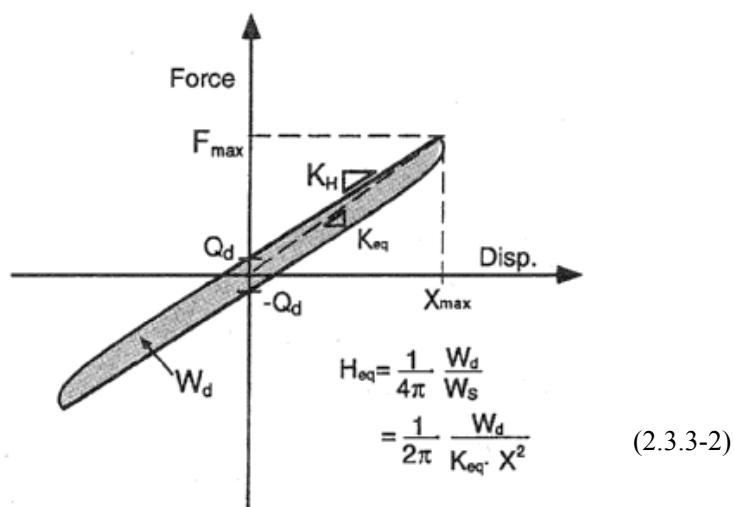


図 2.3.3-4 等価粘性減衰 h_{eq} の算出方法

2) 荷重-変位関係

各試験の荷重-変位関係を図 2.3.3-5~6 (図番号に記号 a を付す) に示す。荷重データは試験機面板の摩擦成分を除去した値を用いている。

荷重-変位関係における履歴形状について見てみると、 $\gamma=100\%$ の振幅範囲で行った基本特性試験では1サイクル目の剛性がやや高めているが2サイクル目と3サイクル目はほぼ重なっており、線形に近い安定した履歴ループを描いている。 $\gamma=200\%$ の振幅範囲で行った長周期試験でも同様に基本特性試験と同様に1サイクル目の剛性がやや高めとなっているが、2サイクル目以降の履歴形状は、サイクルごとにごく僅かな剛性の低下があるものの、サイクルを重ねるごとにより安定した履歴ループを描いている。また $\gamma=200\%$ の長周期試験では若干のハードニング傾向が見られる。長周期試験の続きで行った限界試験についても、安定した履歴ループを描いており、長周期試験とほぼ同様の結果となっている。

3) 温度変化

長周期試験の温度変化を図 2.3.3-5 (図番号に記号 b を付す) に示す。

本試験は載荷速度が 6.67mm/s と遅いため本試験による試験体の温度変化はほとんど見られず、試験体上フランジ(a'面)では7°C前後、試験体中央面(c面)では12.5°C前後と安定していた。

4) 試験前後の荷重-変位関係の変化

長周期または限界試験の前後に行った基本特性試験で得られた荷重-変位関係の比較を図 2.3.3-7 に示す。長周期試験後の基本特性は試験前より剛性がやや低くなっているが、その後の限界試験前と限界試験後の基本特性との差はごく僅かなものであった。

5) Kh 、 Heq の変化

長周期・限界試験の Kh および Heq の変化を図 2.3.3-8 に示す。初期のサイクルで Kh 、 Heq の値が急に低下し、その後はサイクルを重ねるごとに変化の割合は小さくなる傾向にある。また Kh はサイクルを重ねるごとに低下する傾向にあり、それとは逆に Heq は上昇する傾向にあったが、いずれも3サイクルめ以降の変化はごく緩やかなものであった。

各ケースの3サイクルめで評価された Kh 、 Heq の一覧を表 2.3.3-2 に示す。比率欄は最初に実施した基本特性試験の値に対する比率を表している。長周期・限界試験の各ケースを比較すると、サイクルを重ねるごとに Kh が低下し Heq が上昇する傾向が確認できる。長周期・限界試験の前後における基本特性試験の値を比較すると、 Kh は長周期試験後約9%低下し、限界試験後さらに1%程度低下している。 Heq については長周期試験後30%ほど上昇し、限界試験後さらに12%ほど上昇した。

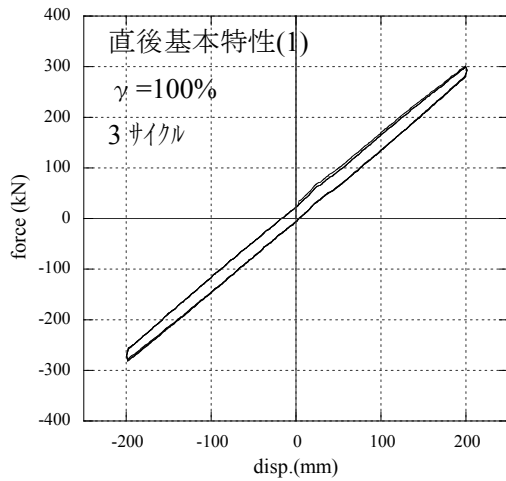
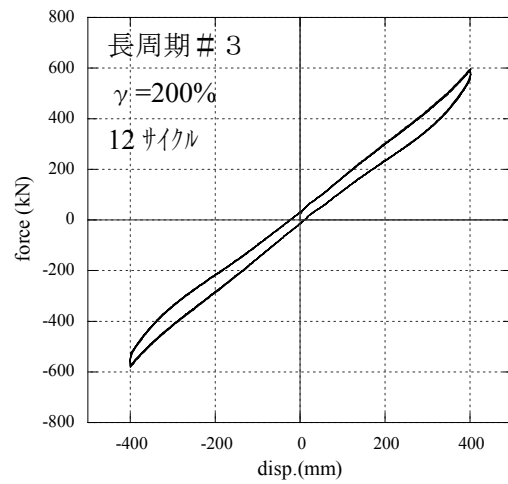
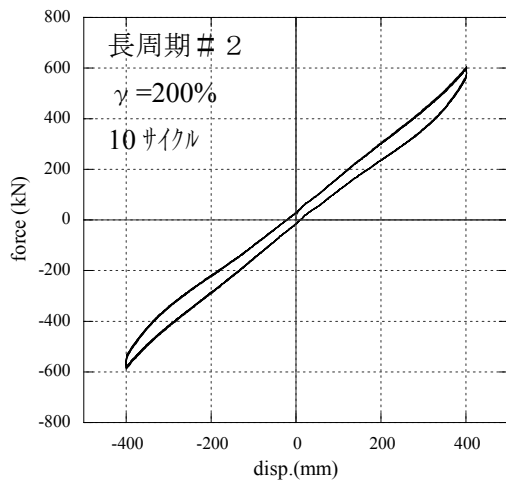
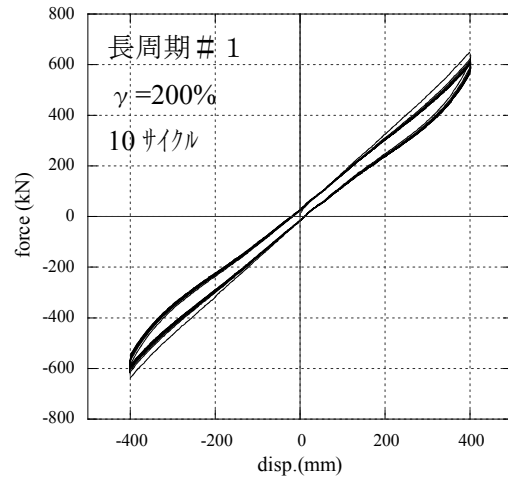
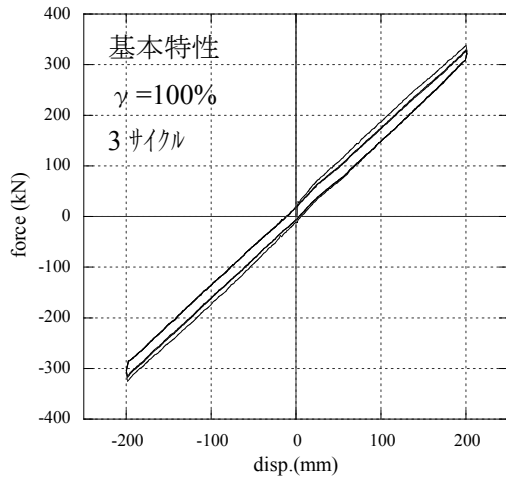


図 2.3.3-5a 荷重-変位関係（長周期特性：累積変形 50m） $\gamma = 200\%$ （ $\pm 402\text{mm}$ ）

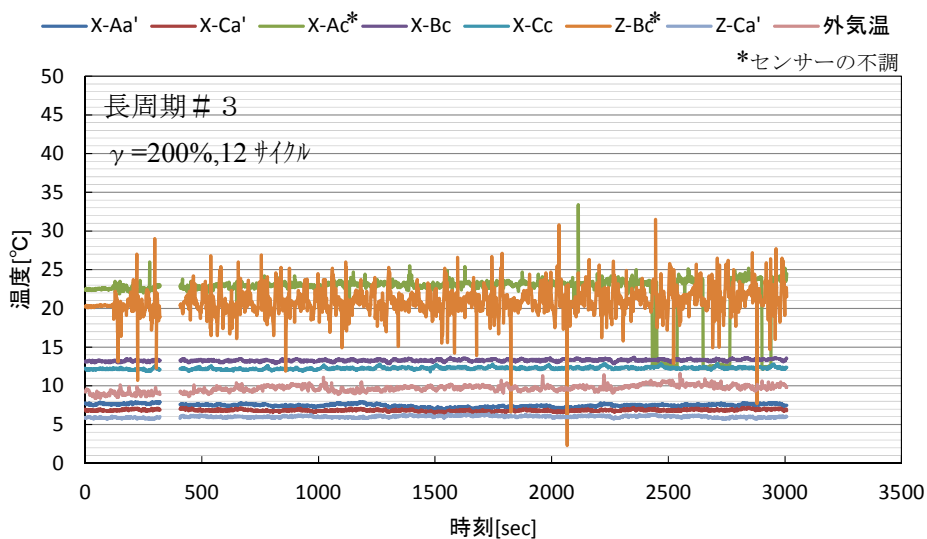
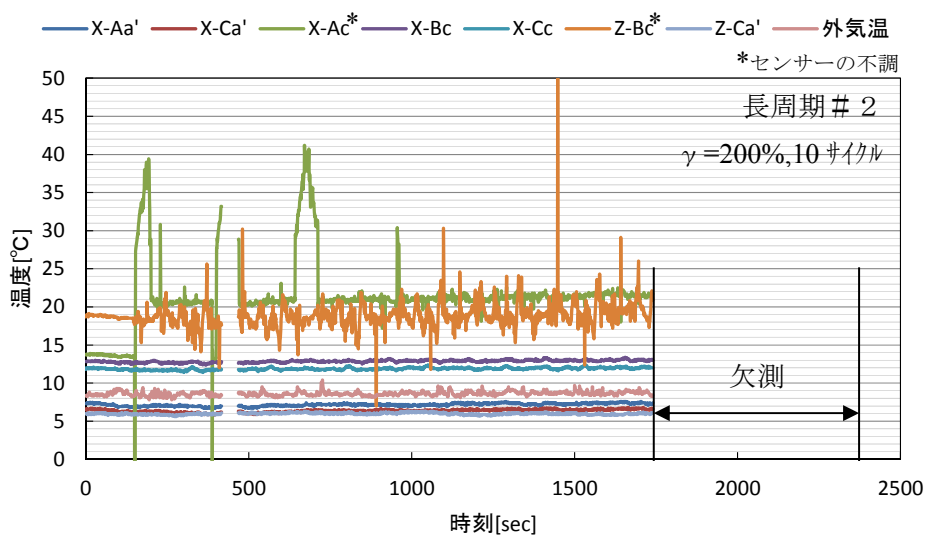
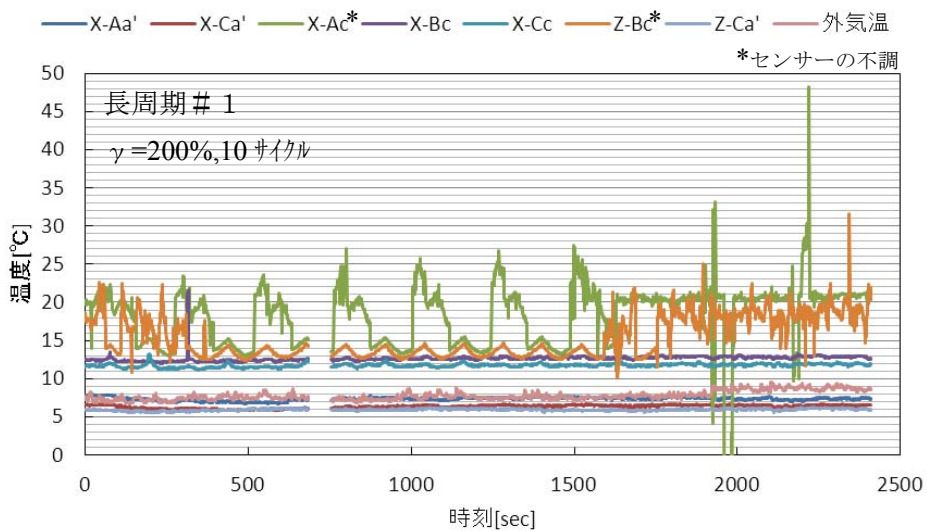


図 2.3.3-5b 温度変化 (長周期) $\gamma=200\%$ ($\pm 402\text{mm}$)

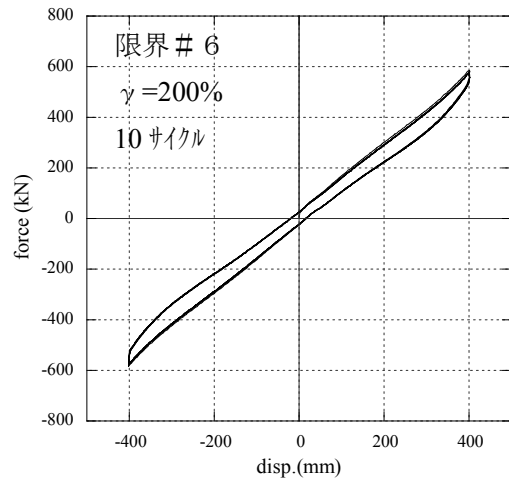
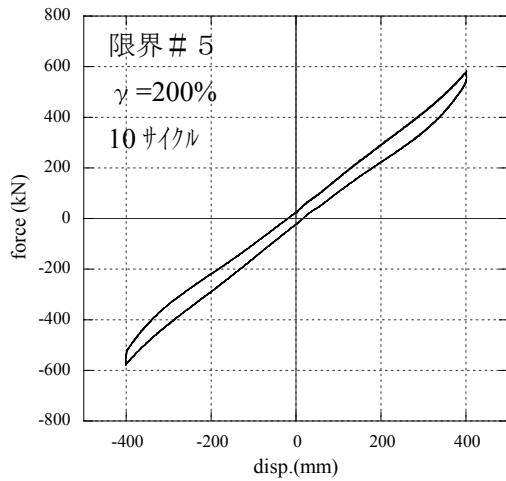
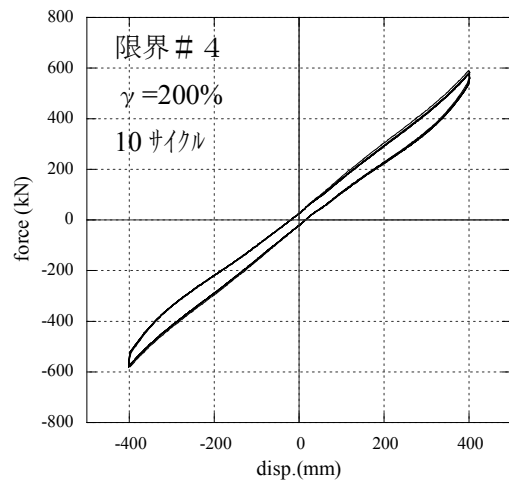
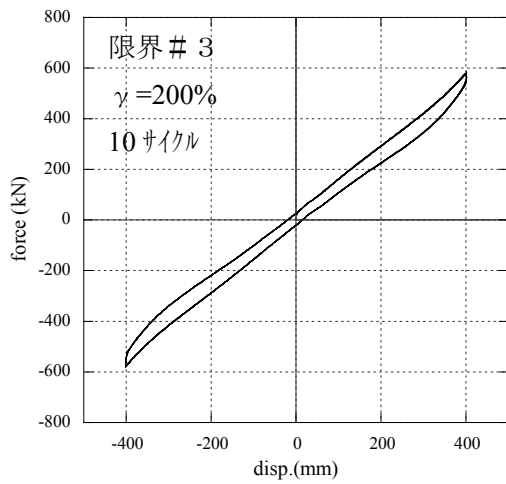
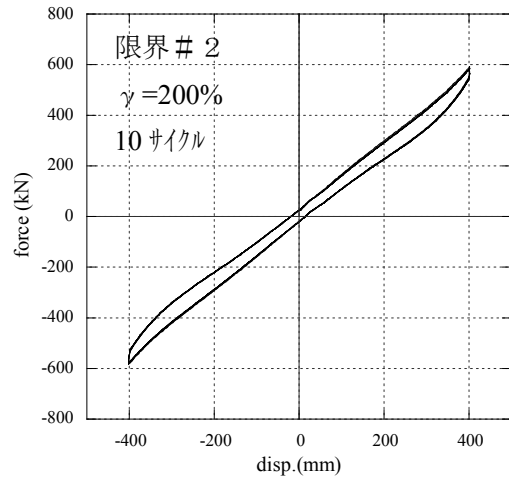
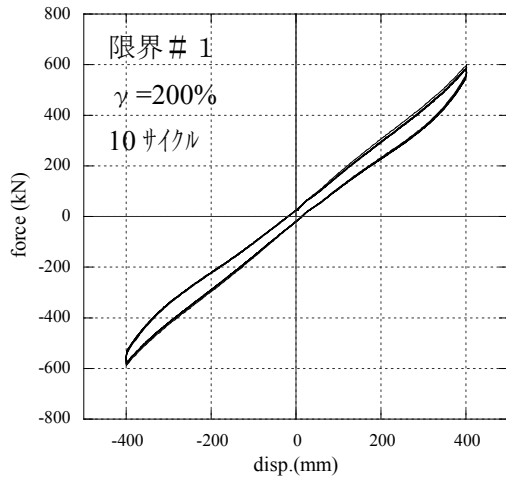


図 2.3.3-6 荷重-変位関係 (限界特性: 累積変形 100m) $\gamma = 200\%$ ($\pm 402\text{mm}$)

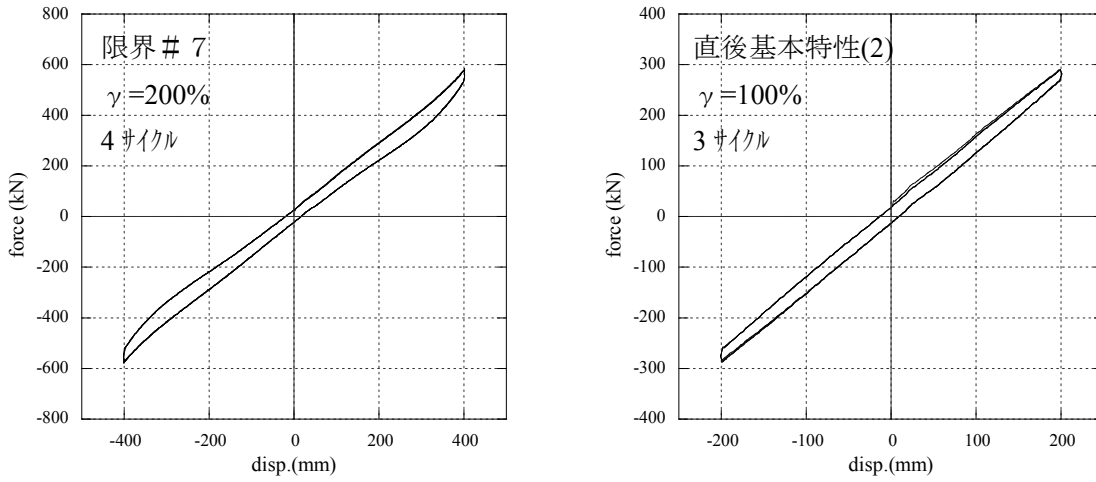


図 2.3.3-6 荷重-変位関係（限界特性：累積変形 100m） $\gamma=200\%$ （ $\pm 402\text{mm}$ ）（続き）

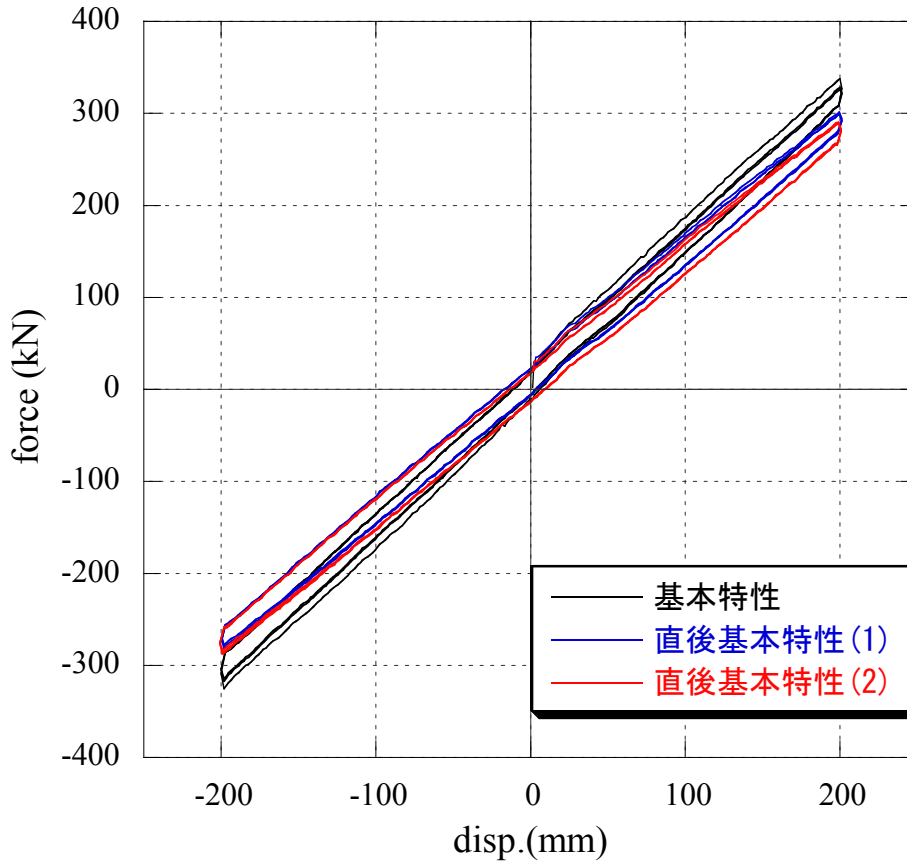


図 2.3.3-7 荷重-変位関係（基本特性の変化）

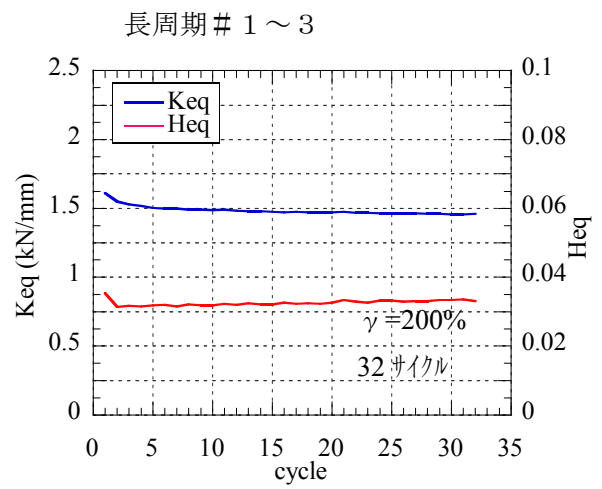
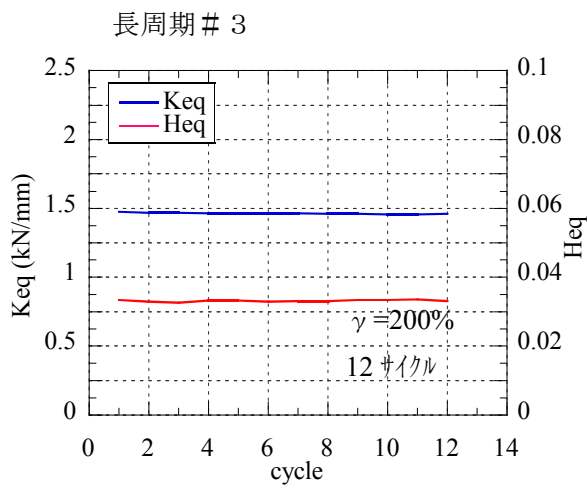
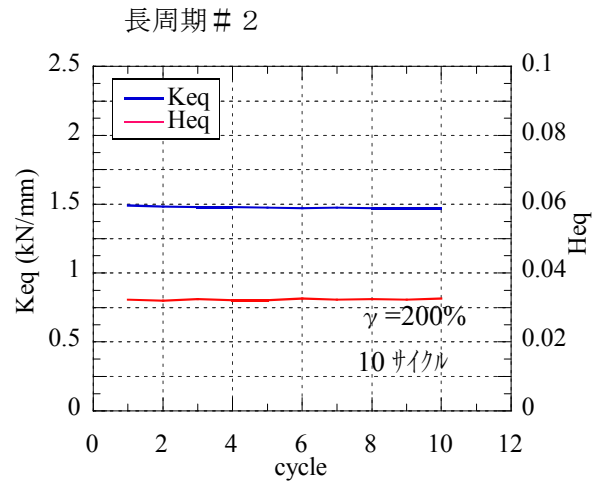
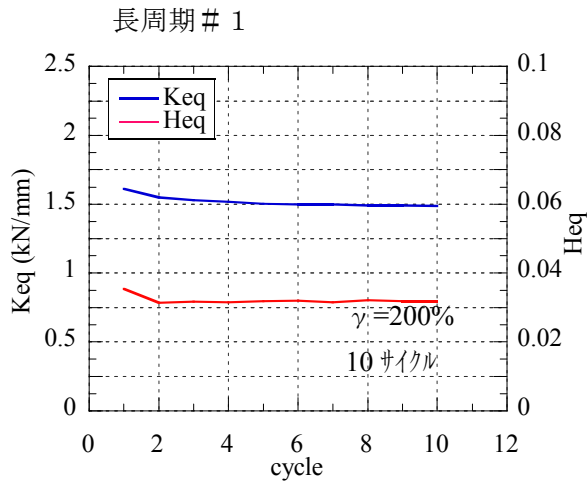


図 2.3.3-8 Kh 、 Heq の変化 (長周期特性、 $\gamma = 200\%$)

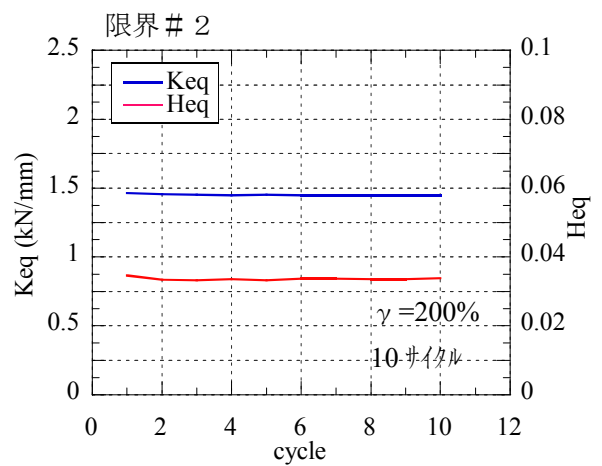
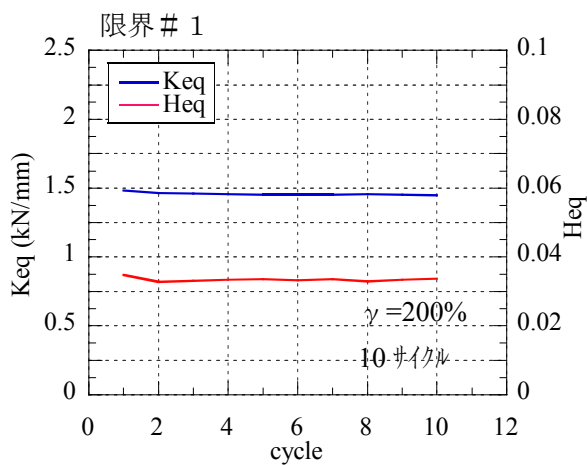


図 2.3.3-8 Kh 、 Heq の変化 (限界特性、 $\gamma = 200\%$)

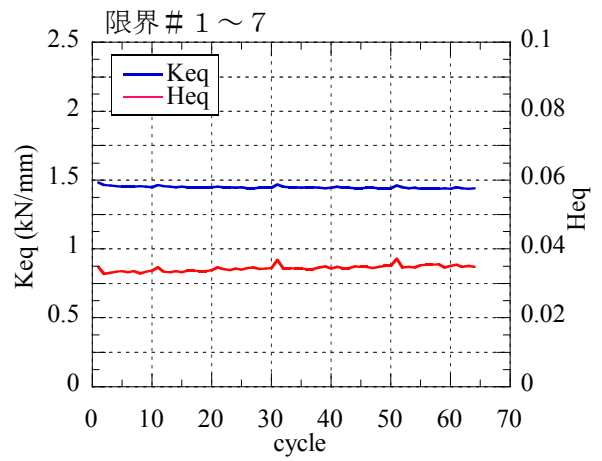
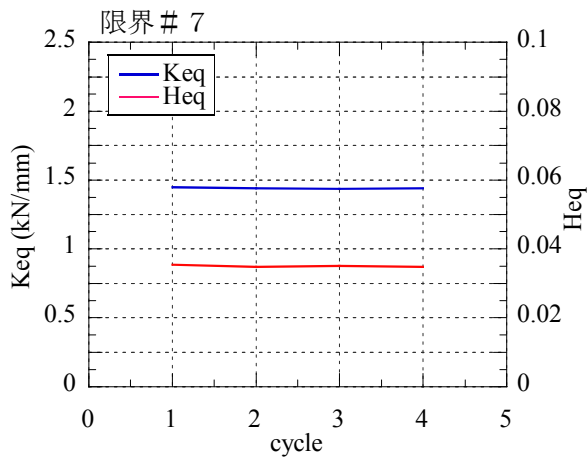
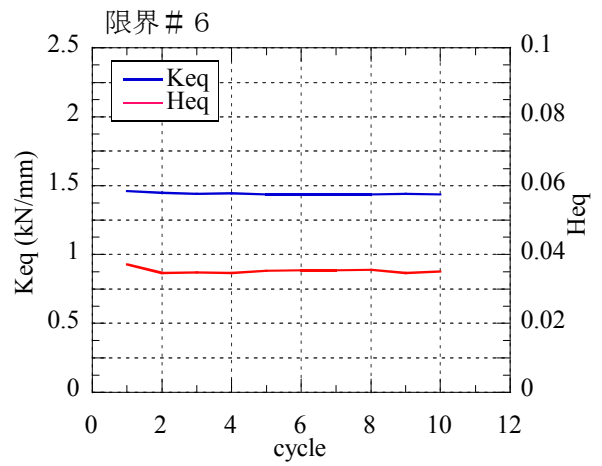
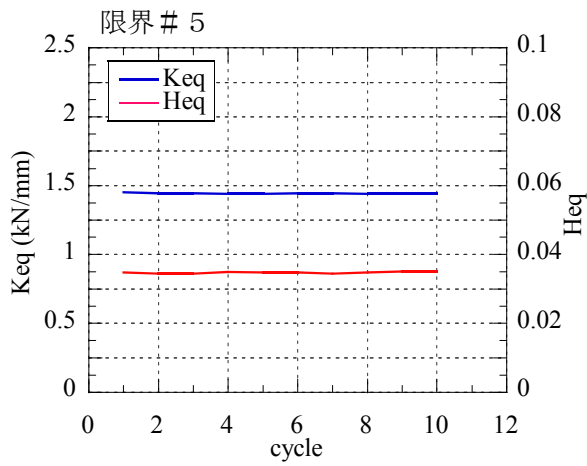
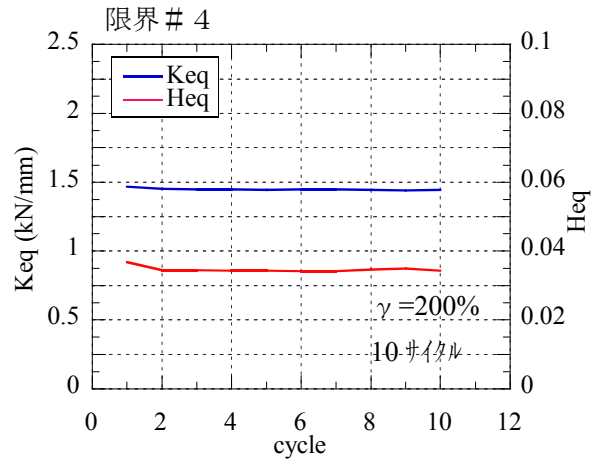
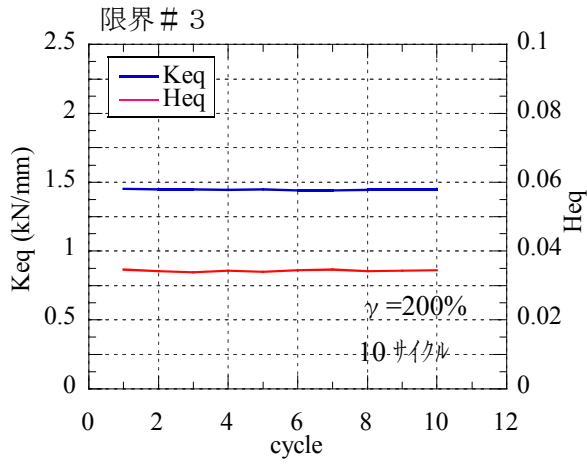


図 2.3.3-8 K_h 、 H_{eq} の変化 (限界特性、 $\gamma = 200\%$) (続き)

表 2.3.3-2 K_h 、 Heq 一覧

ケースNo.	試験条件	サイクル数	K_h (kN/mm)		Heq	
			3サイクルめ	比率	3サイクルめ	比率
1	基本特性	3	1.609	1.000	0.0239	1.000
2	長周期特性#1	10	1.529	0.951	0.0316	1.323
	長周期特性#2	10	1.479	0.920	0.0325	1.357
	長周期特性#3	12	1.468	0.912	0.0327	1.367
3	直後基本特性(1)	3	1.460	0.908	0.0311	1.299
4	限界特性#1	10	1.461	0.908	0.0330	1.381
	限界特性#2	10	1.454	0.904	0.0332	1.388
	限界特性#3	10	1.448	0.900	0.0338	1.413
	限界特性#4	10	1.447	0.899	0.0345	1.442
	限界特性#5	10	1.444	0.898	0.0345	1.441
	限界特性#6	10	1.441	0.896	0.0349	1.457
	限界特性#7	4	1.438	0.894	0.0352	1.470
5	直後基本特性(2)	3	1.447	0.900	0.0341	1.425

6) まとめ

天然ゴム系積層ゴムの実大試験体を用いて、静的条件で多数回繰返し試験を行った。長周期試験（50m）、限界試験（100m）のいずれの条件とも、荷重-変位関係は1サイクル目の剛性がやや高めとなるものの、2サイクル目以降は安定したループを描いており、各ケース3サイクル目の K_h の値を比較しても、最初の基本特性試験と限界試験後の K_h の値は1割ほどであった。また Heq の値は、 K_h の値が低下するのに対して、逆に上昇する傾向にあった。本試験において室温の温度管理は特におこなっていなかったが、支承の温度はどの部分も安定しており、加振による温度変化およびそれに伴う履歴形状の変化は確認されなかった。

参考文献

2.3.3-1) 社団法人日本ゴム協会：免震用積層ゴム委員会技術報告, 2006

2.4 まとめと課題

2.4.1 まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定へ向けて、多数繰り返し加力実験に基づく実大免震部材の特性評価を行うことを目的として、実大弾性すべり支承（直径80cm）と、オイルダンパー（最大減衰力 1000kN）の動的・多数繰り返し加振実験を実施した。本実験で得られた知見は、以下の通りまとめられる。

（1） 実験手法について

- ・震動台稼動時には、震動台周辺に人が近づくことが出来ないため、震動台から離れた位置から加力実験を行う必要がある。遠隔操作の油圧ジャッキにより試験体と反力フレームを固定し、コッターでせん断力を伝達する機構を開発した。開発した機構は設計通りに機能し、震動台に人が近づかずに加力実験を実施することが出来た。
- ・加力波形の作成にあたっては、無負荷時に試加振を行い目標加力波形に対する震動台応答波形の誤差を評価して、誤差波形の逆位相波を用いて補償波を作成する方法が有効であった。水平方向の加振波形については、目標加力波形と震動台応答波形に殆ど誤差が見られなかったため、上下方向加力波形についてのみ逆位相波による補償を行った。
- ・上下方向の誤差振幅は最大で 2.2mm 程度であった。逆位相波による補償時の震動台応答波形では、初期の誤差振幅は 1.4mm 程度に、それ以後の誤差振幅は 0.5mm 程度に抑制されており逆位相波形による補償が有効であった。更に、無負荷時に作成した補償波形を用いて 5MN 軸力導入時に加力を行ったが、上下方向の誤差振幅は無負荷時とほぼ同等であった。無負荷時に補償波形を作成して、軸力導入時に用いる方法が有効であることがわかった。
- ・5000kN 軸力導入時の主梁フレームの上下変形は 17.4mm、受梁方向（主梁 U 軸回り）の傾斜角は 1/588 であった。この時に、震動台の U 軸回りの傾斜を 1/769 に制御して支承面圧の均一化を行った。受梁軸回りには殆ど回転していない。5000kN の導入軸力に対して水平方向加力初期に 500kN 程度の変動が見られるが、それ以後は 200kN 程度以内の軸力変動に収まっており、精度の高い加振が実現出来ている。反力フレームの変形も小さく、目標通り主梁方向に±400mm の加力が実現出来ている。
- ・反力フレーム各部に取付けた歪ゲージから、加力実験時の応力を評価した結果、主梁方向の長周期繰り返し加振時に主梁端部で最大の応力が発生しているが、長期許容応力に対する比率は 0.73 であり、反力フレームは十分な性能を有していることを確認した。

（2） 弾性すべり支承の加力実験

- ・累積変形 50m の長周期試験を経験する前後で繰り返しによる影響を見ると、摩擦係数が 0.147 から 0.062 と初期の 42%程度にまで低下した。各セット毎に繰り返しの伴って摩擦係数が低下する傾向が見られ、セット間のインターバルでは摩擦係数が回復（上昇）する傾向を確認した。
- ・長周期試験終了後のすべり板温度は、長周期試験（1 方向）で 204℃、長周期試験（2 方向）-1 で 220℃、長周期試験（2 方向）-2 で 260℃まで、それぞれ上昇した。PTFE 裏のバック鋼板部の温度上昇はすべり板に比べて上昇速度は緩やかであるものの、インターバルの影響もなく上昇が続き、加振後も温度上昇が続く傾向があった。

・長周期および限界試験を経験したすべり支承試験体は、すべり面の PTFE に損傷は見られず健全な状態を保っていた。今回の試験では面圧が 10N/mm^2 と低いことも有り、すべり面の温度上昇に伴う PTFE の軟化現象などは確認されなかった。なお、今回の試験条件では、長周期試験は地震応答波試験の 10 倍相当以上の累積吸収エネルギーを確保することを確認した。

(3) オイルダンパーの加力実験

・限界加振条件 3B (累積変形量約 100m) の加振による油温上昇量は 93.6°C (油温 $14.6^\circ\text{C} \rightarrow 108.2^\circ\text{C}$) であった。本体 (ベースシェル) 表面温度も、ロッド側の測点 (T5) で 102.1°C となったが、履歴性状の変化は小さく、また、シール部から作動油のしみだしは見られなかった。

・多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られる。常温 (20°C) に対する最大減衰力の低下率は、油温 (108°C) においても伸び側・縮み側共に約 4% であった。また、エネルギー吸収量の低下率は、油温 (108°C) においても約 5% の低下であった。

・大変形・大速度試験では、各加振の 1 波目では正常な減衰力-変位特性が得られたが、2 波目では圧縮側の減衰力に立ち上がり遅れ (無効ストローク) が発生した。

2.4.2 課題

・実験手法については、十分な精度で免震部材の加力実験が実施出来ることが判明したが、ロードセルの許容荷重の制約から導入軸力は 5000kN が限界と考えられる。 10000kN の軸力を導入するためには耐荷重の大きいロードセルを製作する必要がある。

・実大免震支承の軸力作用時の動的加振や、実大免震部材 (支承及びダンパー) の大振幅・大速度加振は E-ディフェンス震動台でのみ実施可能である。第IV部 2.3.2 に示したオイルダンパーの実験では、大振幅・大速度加振時に減衰性能に一部低下が見られた。このような従来は充分検証されていない試験条件での免震部材性能を把握することが、安全性検証の上で極めて重要であることが再確認された。

・今後、E-ディフェンス震動台での性能把握が期待される実大免震部材と試験条件を表 2.4.1 に示す。高減衰ゴム系積層ゴムはメーカーにより材料特性が異なっており、オイルダンパーもメーカーにより作動油タンク室の構成方法等のメカニズムが異なっているため、検証が必要と考えられる。本検討では代表的な実大免震部材について必須項目 (◎) を中心に実験を実施している。限られた期間内では、下表に示す全ての実大免震部材の必須項目 (◎) と重要項目 (○) を検証することは出来ないため、今後も引き続き検証実験を計画・実施することが望まれる。

表 2.4-1 免震部材試験条件

免震部材			試験条件							
			メーカー試験機		E-ディフェンス震動台					
			長時間・多数回繰返し動的加振 (累積変形50m~100m)				大振幅 (450%程度)	大速度 (~150kine)	地震波 (高振動数)	上下動 (引張)
			1方向	1方向	1方向	2方向	1方向	1方向	1方向 +2方向	1方向
			縮小		実大					
積層ゴム 支承	天然ゴム系積層ゴム		○				○		○	○
	鉛プラグ入り積層ゴム	丸型	○		◎	○	◎		○	○
		角型			◎	◎	◎		○	○
	錫プラグ入り積層ゴム				◎	○	◎		○	○
	高減衰積層ゴム	B社	○		◎	◎	◎		○	○
		N社			◎	◎	◎		○	○
T社				◎	◎	◎		○	○	
Y社				◎	◎	◎		○	○	
すべり支承	弾性すべり支承	高摩擦	○		◎	◎	○	○	○	
	弾性すべり支承	低摩擦	○		○	○	○	○	○	
履歴系ダンパー	鋼材ダンパー				○	○	○		○	
	鉛ダンパー			○	○	◎	○		○	
粘性ダンパー	オイルダンパー	H社		○	○		◎		○	
		K社			○		◎		○	
		S社			○		◎		○	
	減衰こま			○	○		◎		◎	
			◎	: 必須項目				: H22年度実施済	(第III部第1章)	
			○	: 重要項目				: H23年度実施済	(第IV部第2章)	
								: H24年度実施予定	(第V部第2章)	

2.5 参考資料

2.5.1 参考資料 E-ディフェンス震動台実験データに基づく変位制御の精度検討

(1) 変位制御加振実験（スロッシング実験）

30t の試験体を搭載して、加振振幅を $\pm 200\text{mm}$ （振動数 0.55Hz ）と $\pm 450\text{mm}$ （振動数 0.54Hz ）に変えて、水平方向に変位制御正弦波加振実験を実施した場合の震動台応答実測例を図 1 と図 2 に示す。Z 軸（上下方向）には水平方向に対して倍の振動数の応答が生じ、加振振幅が $\pm 450\text{mm}$ の場合には上下方向に 4mm 程度の変位が生じている。

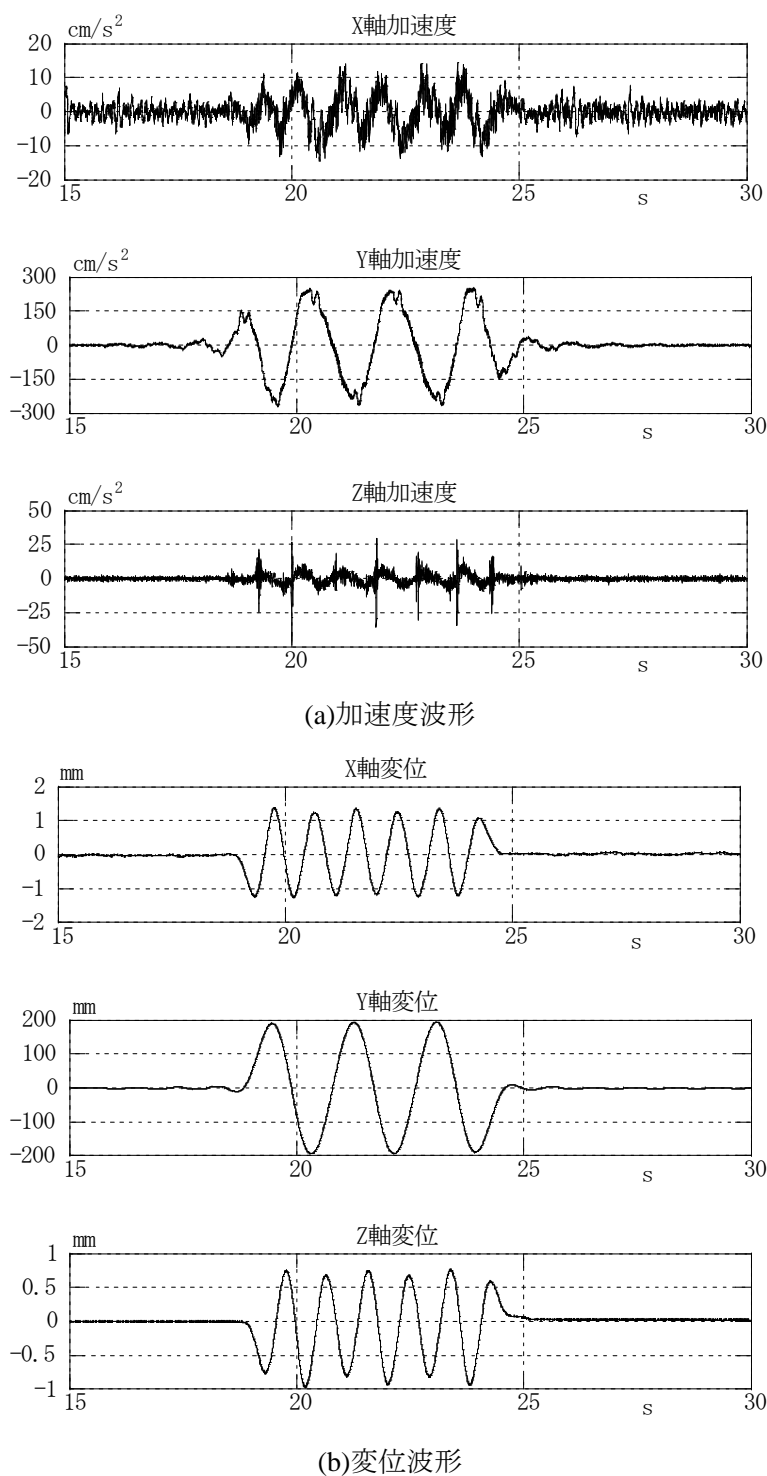
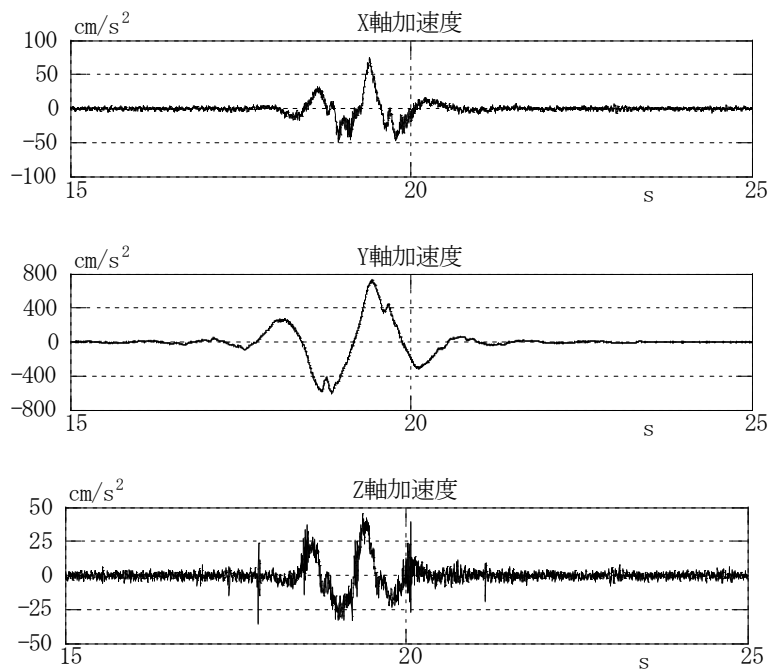
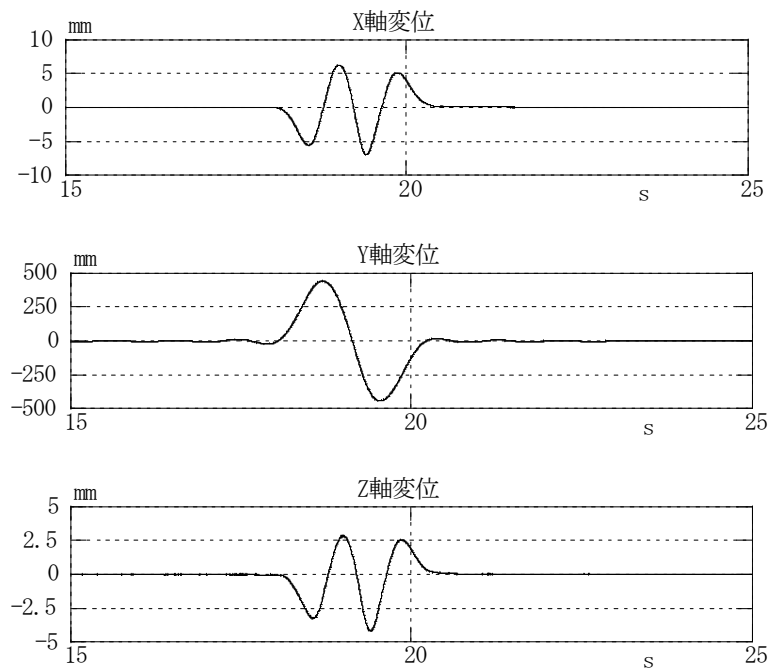


図 1 Y 方向変位制御正弦波加振（振幅 $\pm 200\text{mm}$ ）時の震動台応答



(a)加速度波形

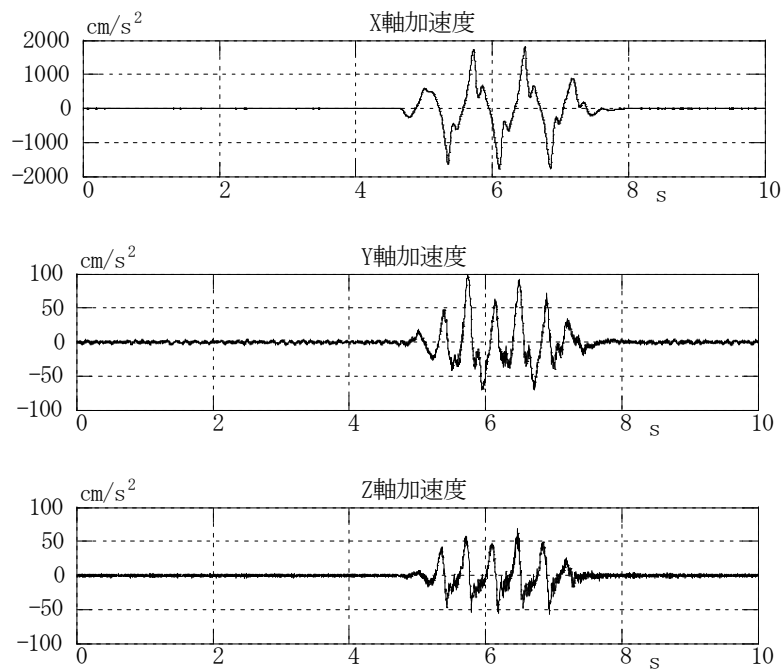


(b)変位波形

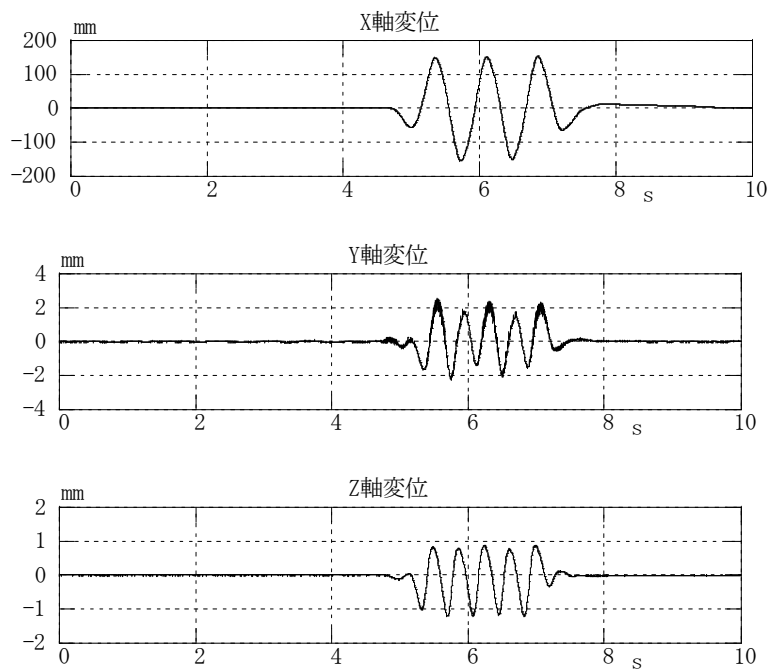
図2 Y方向変位制御正弦波加振（振幅±450mm）時の震動台応答

(2) 無負荷時の加速度制御加振実験

無負荷で、水平方向に加速度制御正弦波加振実験を実施した場合の震動台応答実測例を図3に示す。Z軸（上下方向）には水平方向に対して倍の振動数の応答が生じ、上下方向に1mm程度の変位が生じている。



(a) 加速度波形



(b) 変位波形

図2 X方向加速度制御正弦波加振時の震動台応答

2.5.2 参考資料 震動台の加振継続時間について

水平加振時の加振速度と加振可能時間の関係を図 1 に示す。震動台の加振可能時間は、加振速度に関係する。実大実験では、振幅 40cm、周期 4 秒の正弦波加振を行うので、最大速度は約 60cm/s となり、対応する加振可能時間は約 30 秒である。この時の累積変形は、 $40\text{cm} \times 4 \times (30 \div 4) = 1,200\text{cm}$ となる。

実際には、余裕を考慮して 15m 程度の累積変形は可能と見込まれる。

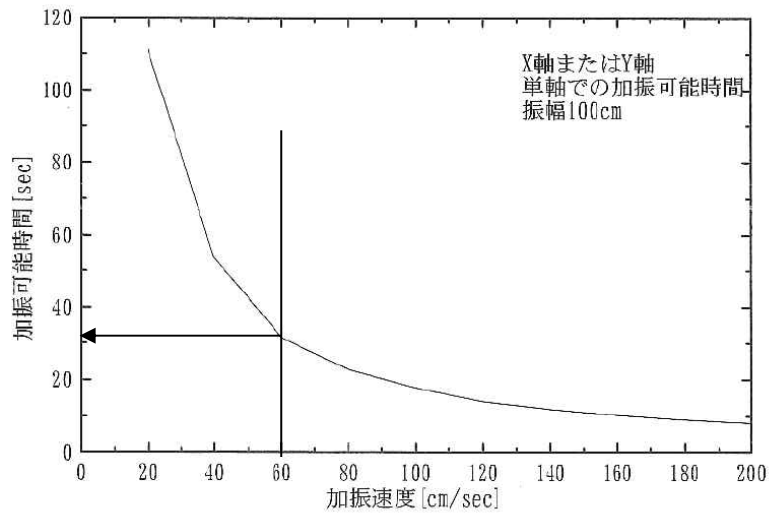


図 1 水平加振時の加振継続時間 —実大実験計画 WG 資料（防災科研）より—

2.5.3 参考資料 実験治具計算書

1. 検討方針

免震部材の動的大変形試験を行うための治具としての性能を満足することを確認するため。大変形時の大加力に対して構造体が安全化であるか、また変形量が所定の値程度となっているかについて確認する。

治具の構造体としての安全性は以下とする。

- ・大変形時の加力に対して構造体の鋼材に生じる応力度が、ほぼ長期許容応力度以内であるものとする。
- ・破断実験時の水平力については衝撃係数1.5倍を考慮し、構造体が上記性能を満足するものとする。

治具に要求される変形量は以下とする。

- ・免震部材に生じる圧縮力（max 1000 kN）時の鉛直変形はほぼ40 mm程度とする。

2. 検討ケース

検討は治具に加わる鉛直力・水平力が最大となると想定される積層ゴムアイソレーターを試験体とした場合について行う。

想定する積層ゴムアイソレーターは1000φとし、2次形状係数は5とし、主梁方向にはせん断変形250%、受け梁方向には破断変形である450%変形させるものものとする。

この際の圧縮力は1000kN、水平力は250%時に2000kN、450%時には6000kNとする。

なお、破断変形である450%時の水平力は衝撃係数1.5を考慮して、

$$6000\text{ kN} \times 1.5 = 9000\text{ kN} \quad \text{として検討を行う。}$$

以上より、治具の構造体の安全性を確認するための荷重ケースは以下とする。

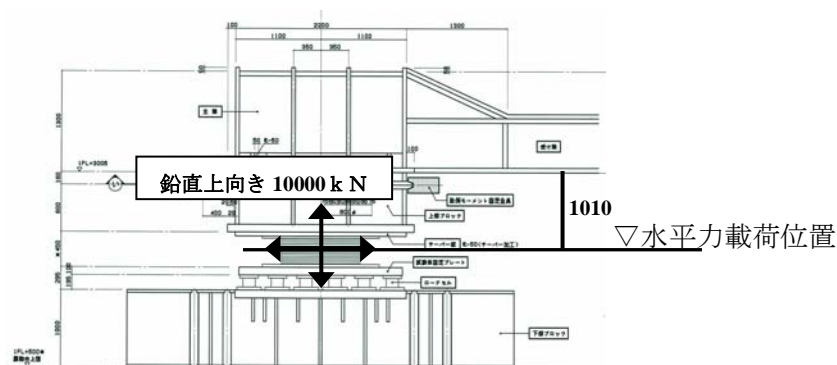
CASE 1 鉛直荷重 (10000kN 上向き)

CASE 2 鉛直荷重 (10000kN 上向き) + 水平荷重 (2000kN 主梁軸方向)

CASE 3 鉛直荷重 (10000kN 上向き) + 水平荷重 (9000kN 受け梁軸方向)

なお、次具の自重については試験体位置に加わる鉛直上向き荷重に比べ十分に小さく、逆向きのため、考慮しないものとする。

上記の水平荷重は、下図に示す積層ゴムアイソレーターの高さ中央部に生じるものとする。



また、CASE 2とCASE 3における鉛直荷重は、次頁に示すように積層ゴムアイソレーターの変形量の1/2の位置に加えるものとする。

CASE 2 積層ゴムアイソレーター変形量

せん断変形250% ゴム総厚 1000mm/5=200mm

200mm×250%=500mm

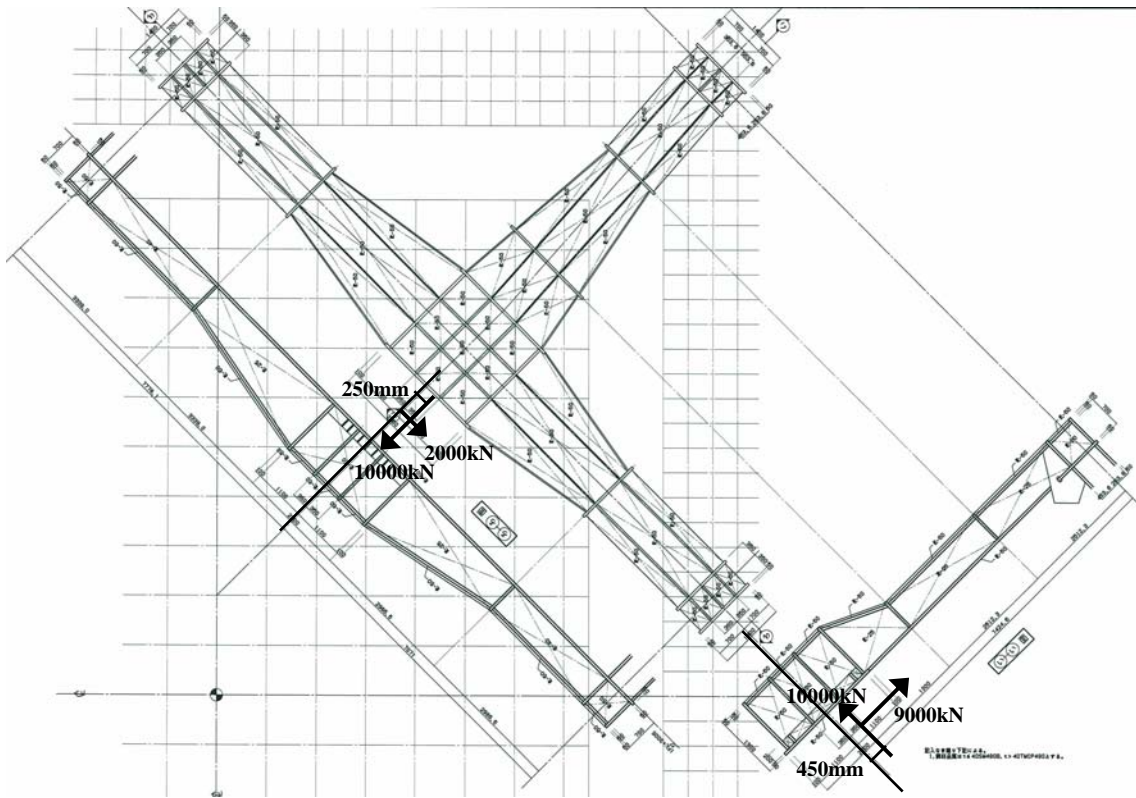
鉛直荷重载荷位置 500mm/2=250mm

CASE 3 積層ゴムアイソレーター変形量

せん断変形450% ゴム総厚 1000mm/5=200mm

$$200\text{mm} \times 450\% = 900\text{mm}$$

$$\text{鉛直荷重載荷位置 } 900\text{mm} / 2 = 450\text{mm}$$



CASE 2 と CASE 3 における荷重載荷位置

3. 解析モデルおよび解析結果

□ 解析モデル概要

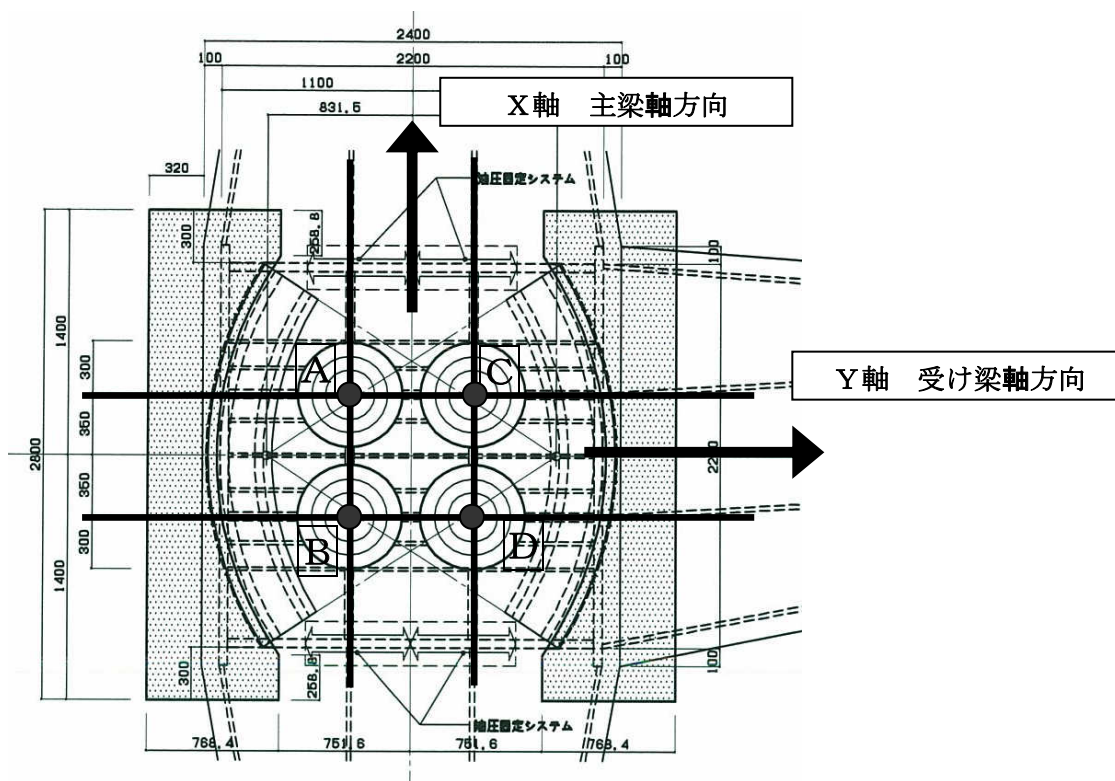
解析モデルは、線材置換モデルとした。部材の内、主梁・受け梁のウェブが4枚の位置については、ねじれの影響を考慮するため2本の梁とし、それぞれの梁をねじれについて拘束するための剛な梁で繋いだモデルとした。

柱脚部は、固定ブロックが非常に大きな剛性を持つため、固定ブロック上面で変位・回転を固定とした。

解析においては、軸方向剛性・曲げ剛性・せん断剛性ならびにねじれ剛性を考慮した。

解析は弾性解析とし、日建設計保有の解析プログラム「Super Dynamics」を使用した。

□ 試験体直上での治具変形量



次頁にA・B・C・D位置の各方向の各CASEにおける変形量を示す。

(単位mm)

		X方向 主梁軸 方向	Y方向 受け梁 軸方向	Z方向 鉛直方 向	Z方向 CASE1 との差	X軸廻り回転
CASE1	A	0.3	2.4	41.4		1/ 174
	B	0.4	2.4	41.1		
	C	0.3	2.4	37.4		
	D	0.3	2.5	37.0		
CASE2	A	3.9	2.5	40.9	-0.5	1/ 175
	B	3.9	2.7	41.3	0.2	
	C	3.7	2.5	36.9	-0.4	
	D	3.7	2.7	37.3	0.2	
CASE3	A	1.0	7.7	36.2	-5.2	1/ 519
	B	1.0	7.7	36.0	-5.1	
	C	0.9	7.6	34.9	-2.5	
	D	1.0	7.6	34.6	-2.4	

CASE1（鉛直10000kN時）における鉛直変位は、目標としていた約40mmとなっている。

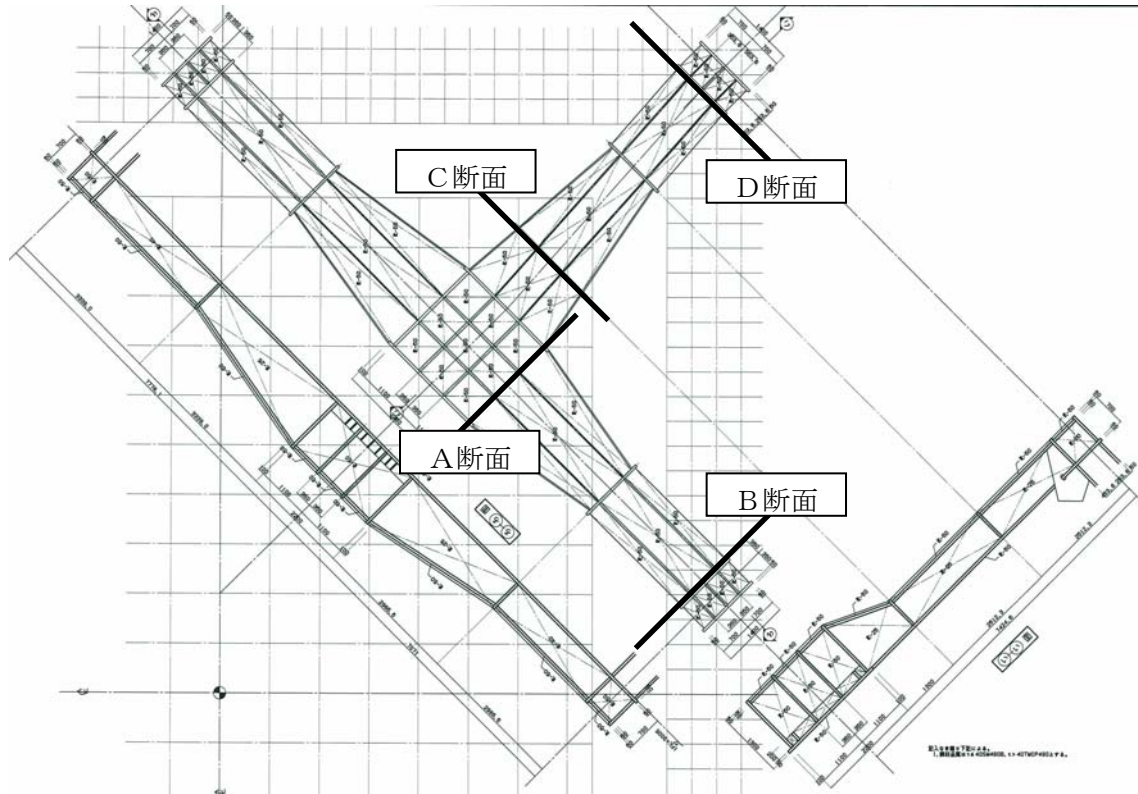
このとき、受け梁の勾配により、試験体取り付け位置直上では治具が、全頁X軸廻りに1/174回転することが確認された。

CASE2（主梁方向に2000kN）においては、主梁軸方向に約3.5mm程度変形するものの、鉛直変位についてはCASE1との変化は少ないことが確認された。

CASE3（受け梁方向に9000kN）においては、受け梁方向に約5mm程度変形し、水平力により受け梁が曲げ変形するため、A・B点位置が5mm下降し、C・D点位置でも2.5mm下降することが確認された。

4. 各部検討

□ 主梁・受け梁の検討



鋼材 TMCP490 F 値 325N/mm^2 長期許容応力度 軸曲げ 21.6kN/cm^2 せん断 12.5kN/cm^2

・ A断面

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 2

$$N = 3104\text{ kN} \quad M = 20864\text{ kNm} \quad Q = 4707\text{ kN}$$

断面性能 BX-1300×2200×25(4枚)×50

$$A = 3400\text{ cm}^2 \quad A_s = 1200\text{ cm}^2 \quad Z = 154435\text{ cm}^3$$

$$\sigma = 3104 / 3400 + 20864 / 154435 \times 100 = 14.4\text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 4707 / 1200 = 3.9\text{ kN/cm}^2$$

・ B断面

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 2

$$N = 3104\text{ kN} \quad M = 8167\text{ kNm} \quad Q = 4707\text{ kN}$$

フェイスモーメント

$$M' = 8167 - 4707 \times 0.35 \text{ m} = 6520 \text{ kNm}$$

断面性能 BX-700×1300×40(2枚)×50

$$A = 1780 \text{ cm}^2 \quad A_s = 480 \text{ cm}^2 \quad Z = 43423 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 3104 / 1780 + 6520 / 43423 \times 100 = 16.8 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 4707 / 480 = 9.8 \text{ kN/cm}^2$$

・C断面

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 3

$$N = 8651 \text{ kN} \quad M = 4284 \text{ kNm} \quad Q = 1645 \text{ kN}$$

断面性能 BX-700×1900×25(4枚)×50

$$A = 2500 \text{ cm}^2 \quad A_s = 600 \text{ cm}^2 \quad Z = 62595 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 8651 / 2500 + 4284 / 62595 \times 100 = 10.3 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 1645 / 600 = 2.7 \text{ kN/cm}^2$$

・D断面

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 3

$$N = 8651 \text{ kN} \quad M = 4156 \text{ kNm} \quad Q = 1645 \text{ kN}$$

フェイスモーメント

$$M' = 4156 - 1645 \times 0.35 \text{ m} = 3580 \text{ kNm}$$

断面性能 BX-700×1300×25(2枚)×50

$$A = 1600 \text{ cm}^2 \quad A_s = 300 \text{ cm}^2 \quad Z = 41880 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 8651 / 1600 + 3580 / 41880 \times 100 = 14.0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 1645 / 300 = 5.5 \text{ kN/cm}^2$$

□ 主梁支持柱の検討

鋼材 TMCP490 F 値 325N/mm^2 長期許容応力度 軸曲げ 21.6kN/cm^2 せん断 12.5kN/cm^2

・柱上部

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 2

$$N = 4270 \text{ kN}$$

$$M = 9344 \text{ kNm}$$

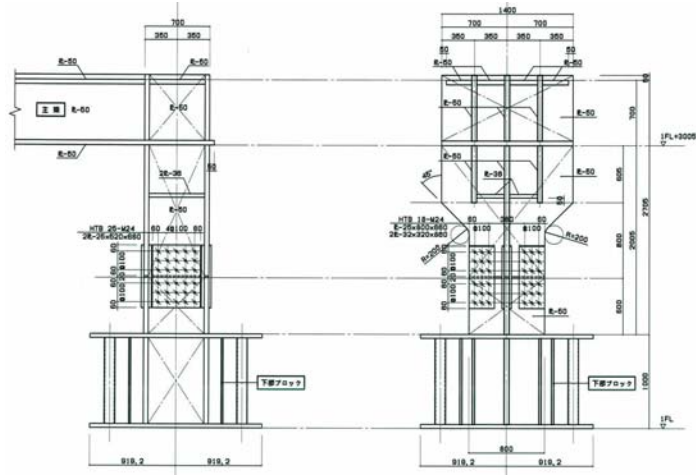
$$Q = 4528 \text{ kN}$$

フェイスモーメント

$$M' = 9344$$

$$-4528 \times 0.35 \text{ m}$$

$$= 7759 \text{ kNm}$$



断面性能 H-700×1400×50(3枚)×50

$$A = 2300 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 900 \text{ cm}^2$$

$$Z = 50047 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 4270 / 2300 + 7759 / 50047 \times 100 = 17.4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 4528 / 900 = 5.0 \text{ kN/cm}^2$$

・柱下部

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 2

$$N = 4993 \text{ kN}$$

$$M = 5666 \text{ kNm}$$

$$Q = 4528 \text{ kN}$$

断面性能 H-700×800×50×50

$$A = 1100 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 300 \text{ cm}^2$$

$$Z = 26761 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 4993 / 1100 + 5666 / 26761 \times 100 = 25.7 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 4528 / 300 = 15.1 \text{ kN/cm}^2$$

若干長期許容応力度を越える結果となっている。

□ 受け梁支持柱の検討

鋼材 TMCP490 F 値 325N/mm^2 長期許容応力度 軸曲げ 21.6kN/cm^2 せん断 12.5kN/cm^2

・柱上部

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 3

$$N = 5756 \text{ kN}$$

$$M = 4153 \text{ kNm}$$

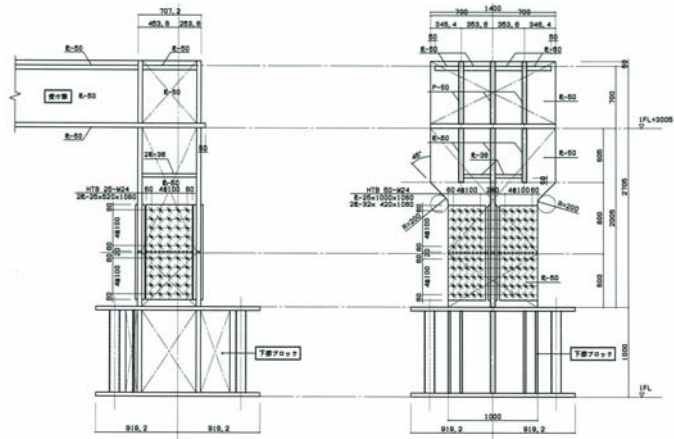
$$Q = 711 \text{ kN}$$

フェイスモーメント

$$M' = 4153$$

$$- 711 \times 0.35 \text{ m}$$

$$= 3904 \text{ kNm}$$



断面性能 H-707×1400×50(3枚)×50

$$A = 2311 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 911 \text{ cm}^2$$

$$Z = 42820 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 5756 / 2311 + 3904 / 42820 \times 100 = 11.6 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 711 / 911 = 0.8 \text{ kN/cm}^2$$

・柱下部

解析結果より応力は以下となっている。

CASE 2

$$N = 5756 \text{ kN}$$

$$M = 3473 \text{ kNm}$$

$$Q = 711 \text{ kN}$$

断面性能 H-707×1000×50×50

$$A = 1304 \text{ cm}^2$$

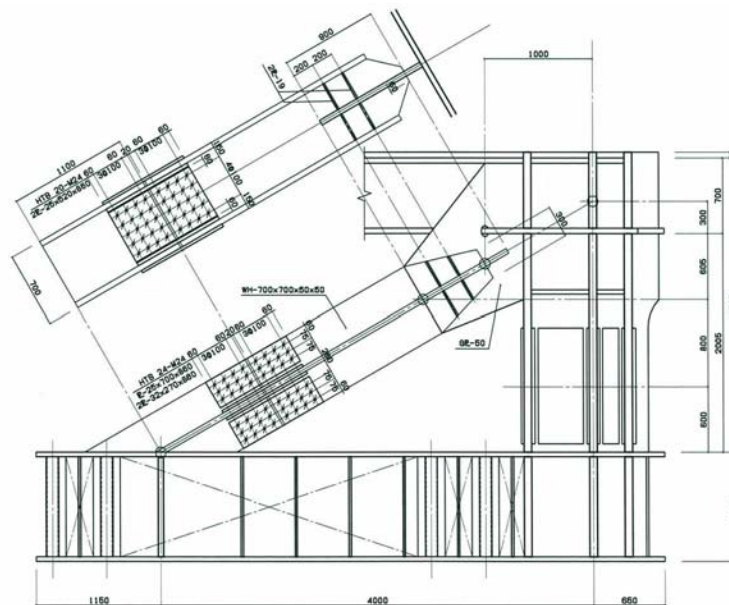
$$A_s = 304 \text{ cm}^2$$

$$Z = 33221 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 5756 / 1304 + 3473 / 33221 \times 100 = 14.9 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau = 711 / 304 = 2.3 \text{ kN/cm}^2$$

□ 受け梁支持ブレースの検討



解析結果より応力は以下となっている。

CASE 3

$$N = 7791 \text{ kN} \quad M_y = 378 \text{ kNm} \quad Q = 66 \text{ kN}$$

断面性能 H-700×700×50×50

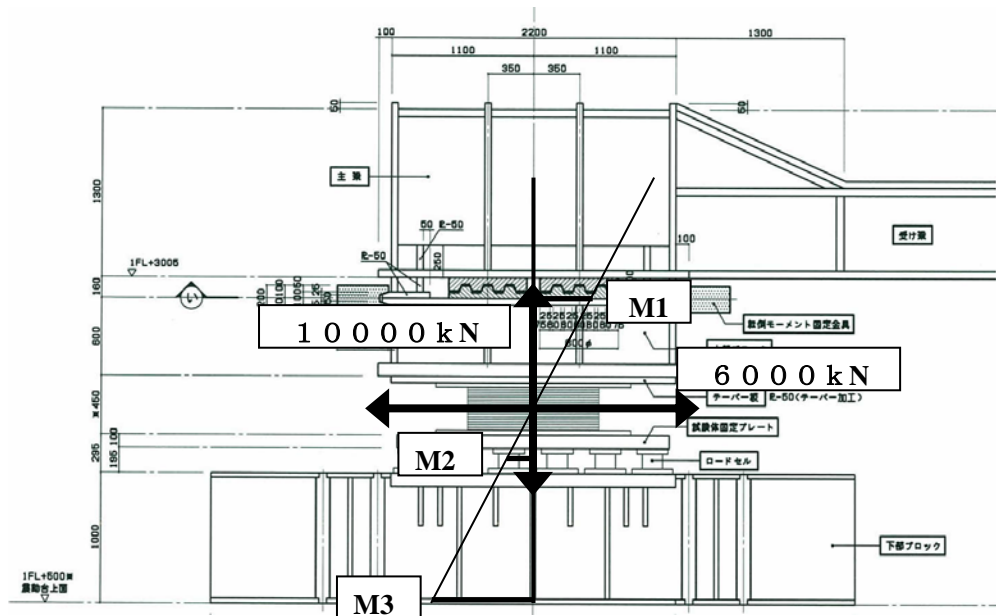
$$A = 1000 \text{ cm}^2 \quad Z_y = 8416 \text{ cm}^3$$

$$\sigma = 7791 / 1000 + 378 / 8416 \times 100 = 12.3 \text{ kN/cm}^2$$

τ は検討を省略

□ 上部ブロックの検討

加力時に試験体廻りに生じる応力に対して上部ブロックおよび転倒モーメント固定金具等が安全であることを確認する。



$$M1 = 6000 \text{ kN} \times (400 \text{ mm} / 2 + 50 \text{ mm} + 600 \text{ mm}) / 1000$$

$$= 5100 \text{ kNm} \quad (\text{上部ブロック上面位置})$$

$$M2 = 6000 \text{ kN} \times (400 \text{ mm} / 2 + 100 \text{ mm} + 195 \text{ mm} / 2) / 1000$$

$$= 2385 \text{ kNm} \quad (\text{ロードセル高さ中央位置})$$

$$M3 = 6000 \text{ kN} \times (400 \text{ mm} / 2 + 100 \text{ mm} + 195 \text{ mm} + 1000 \text{ mm}) / 1000 = 8970 \text{ kNm} \quad (\text{下部ブロック下面位置})$$

(水平力6000 kNに衝撃係数1.5を考慮した場合)

$$M1 = 6000 \text{ kN} \times 1.5 \times (400 \text{ mm} / 2 + 50 \text{ mm} + 600 \text{ mm}) / 1000$$

$$= 7650 \text{ kNm} \quad (\text{上部ブロック上面位置})$$

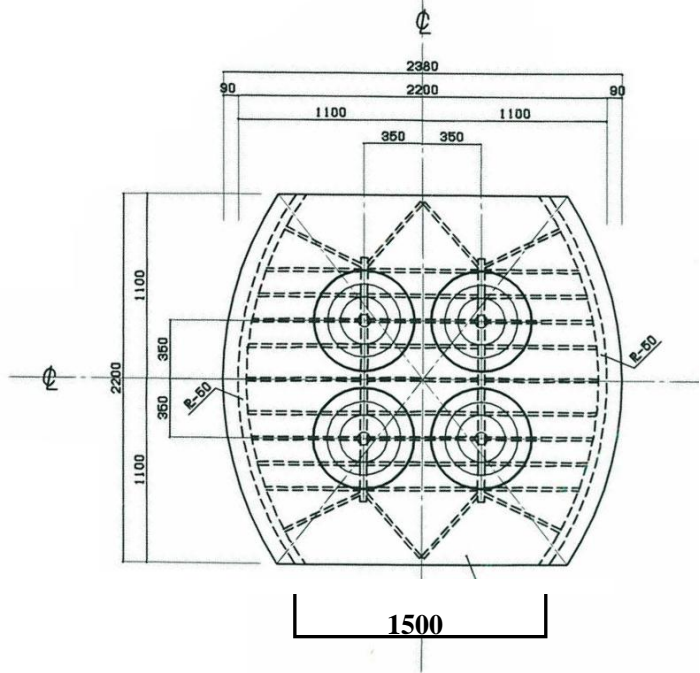
$$M2 = 6000 \text{ kN} \times 1.5 \times (400 \text{ mm} / 2 + 100 \text{ mm} + 195 \text{ mm} / 2) / 1000$$

$$= 3578 \text{ kNm} \quad (\text{ロードセル高さ中央位置})$$

$$M3 = 6000 \text{ kN} \times 1.5 \times (400 \text{ mm} / 2 + 100 \text{ mm} + 195 \text{ mm} + 1000 \text{ mm}) / 1000 = 13455 \text{ kNm} \quad (\text{下部ブロック下面位置})$$

・上部ブロック上部の転倒モーメント固定用コッター部の検討

転倒モーメントM1をコッター
 平均幅の1850mmで割ると
 $7650 \text{ kNm} / 1.85 \text{ m}$
 $= 4135 \text{ kN}$ (衝撃係数考慮)
 となり、コッター1cm幅あたり
 では
 $4235 \text{ kN} / 220 \text{ cm}$
 $= 18.8 \text{ kN/cm}$
 となる。(衝撃係数考慮)



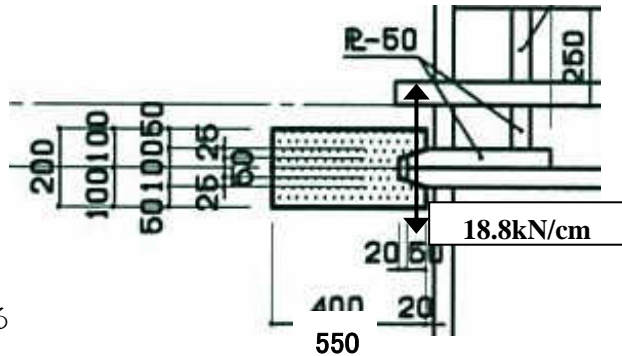
コッター部の曲げは
 $M = 18.8 \times 0.045 \text{ m}$
 $= 0.846 \text{ kNm/cm}$
 $Z = 4.17 \text{ cm}^3$ より
 $\sigma = 0.846 / 4.17 \times 100$
 $= 20.3 \text{ kN/cm}^2$ (衝撃係数考慮)

コッター部は25mm/50mmの
 1/2勾配のため
 水平方向には

$18.8 / 2 = 9.4 \text{ kN/cm}$
 の力が働く

この水平力は上下のコッターに作用する
 ため全体では

$9.4 \times 2 \times 220 \text{ cm} = 4136 \text{ kN}$
 となる。(衝撃係数考慮)



転倒モーメント固定金具には、右図のように
 上記荷重が作用する。

M (中央) $= 4136 / 2 \times 1.25 \text{ m}$
 $- 4136 / 2 \times 0.55 \text{ m}$
 $= 1448 \text{ kNm}$

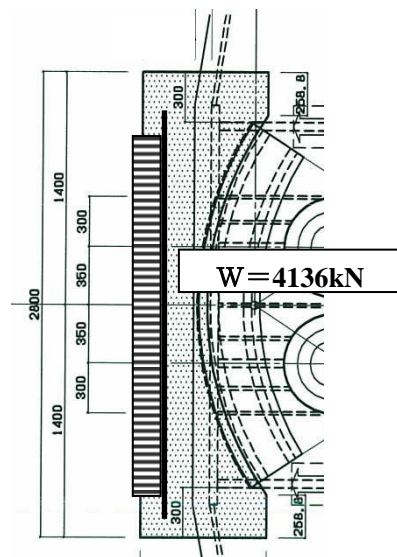
転倒モーメント固定金具の曲げ耐力は

$550 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$

$Z = 5042 \text{ cm}^3$ より

$\sigma = 1448 / 5042 \times 100$

$= 28.7 \text{ kN/cm}^2$ (衝撃係数考慮)



□ 固定プレート・ロードセルの検討

ロードセル 31台

許容荷重 $F_{xy}400\text{kN/台}$ (水平) $F_z700\text{kN/台}$ (鉛直)

全鉛直荷重 10000 kN

全水平力 6000 kN (9000 kNm 衝撃係数考慮)

転倒モーメント (M3) 2385 kNm (3578 kNm 衝撃係数考慮)

平均鉛直力 $10000\text{ kN} / 31 = 322.6\text{ kN/台}$

平均水平力 $6000\text{ kN} / 31 = 193.5\text{ kN/台}$

($9000\text{ kN} / 31 = 290.3\text{ kN/台}$ 衝撃係数考慮)

ロードセルが2100 mm ϕ の試験体固定プレートに均等に配置されているものとし、転倒モーメントが作用した際の最大鉛直力を以下に算定する。

2100 mm ϕ のAおよびZは、

$$A = \pi D^2 / 4 = 3.14 \times 2.1^2 / 4 = 3.462\text{ m}^2$$

$$Z = \pi D^3 / 32 = 3.14 \times 2.1^3 / 32 = 0.9087\text{ m}^3$$

転倒モーメントによる付加鉛直応力度は

$$W = 2385\text{ kNm} / 0.9087\text{ m}^3 = 2625\text{ kN/m}^2$$

$$(W = 3578\text{ kNm} / 0.9087\text{ m}^3 = 3937\text{ kN/m}^2 \text{ 衝撃係数考慮})$$

ロードセル1台あたりの最大鉛直力は

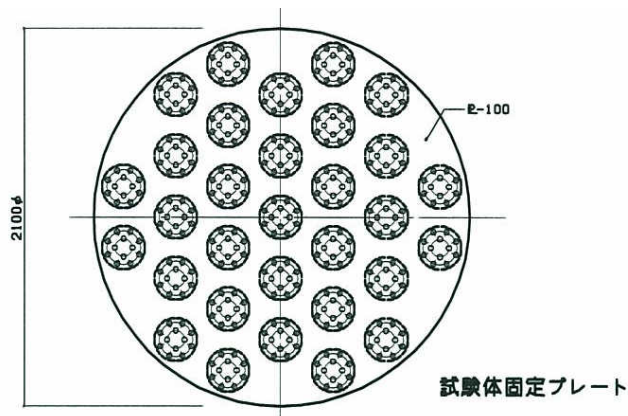
$$322.6\text{ kN} + 2625\text{ kN/m}^2 \times 3.462\text{ m}^2 / 31\text{ 台} = 615.8\text{ kN}$$

$$322.6\text{ kN} - 2625\text{ kN/m}^2 \times 3.462\text{ m}^2 / 31\text{ 台} = 29.4\text{ kN}$$

(衝撃係数考慮時)

$$322.6\text{ kN} + 3937\text{ kN/m}^2 \times 3.462\text{ m}^2 / 31\text{ 台} = 762.3\text{ kN}$$

$$322.6\text{ kN} - 3937\text{ kN/m}^2 \times 3.462\text{ m}^2 / 31\text{ 台} = -117.1\text{ kN}$$



□ 固定ブロック・下部ブロックの固定の検討

解析結果における固定ブロックに加わる曲げ・軸力に対して、固定ブロックの固定ボルト張力（450 kN）にて固定されていることを確認する。

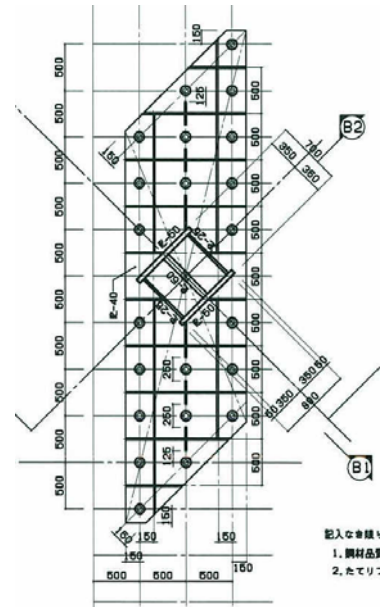
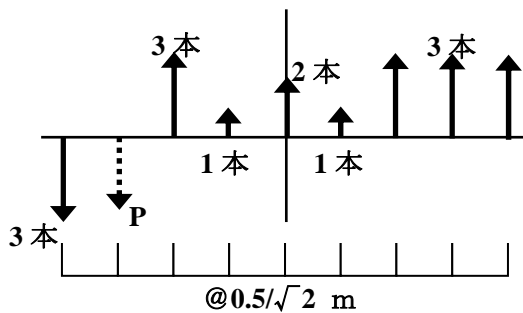
・主梁両端柱下部固定ブロック

解析結果より固定ブロックに加わる曲げ・軸力は

CASE 2

$$M = 3585 + 4528 \times 0.5 \text{ m} = 5849 \text{ kNm (固定ブロック下面)}$$

$$N = 4269 \text{ kN (上向き)}$$



上図のように各ボルト位置にて450 kN/本で押さえこむと想定すると、

破線部のボルト位置に位置作用する力は、軸力との釣り合いより、

$$P = 450 \times (3 + 1 + 2 + 1 + 3 - 3) - 4269 = -1119 \text{ kN}$$

このとき発生する転倒に対する抵抗モーメントは

$$M = 450 \times (3 \times 2.0/\sqrt{2} + 3 \times 1.5/\sqrt{2} + 3 \times 1.0/\sqrt{2} + 1 \times 0.5/\sqrt{2} - 1 \times 0.5/\sqrt{2} - 3 \times 1.0/\sqrt{2} + 3 \times 2.0/\sqrt{2}) + 1119 \text{ kN} \times 1.5/\sqrt{2}$$

$$= 6437 \text{ kNm}$$

となり、固定ブロック下面に作用する曲げを上回っている。

・主梁両端柱下部固定ブロック

ブレースより作用する引き抜き力は、

CASE 3 $N = 7791 \text{ kN}$ から

$$P = 7791 \text{ kN} \times 2.305 \text{ m} / \sqrt{(2.305 \text{ m}^2 + 4.0 \text{ m}^2)}$$

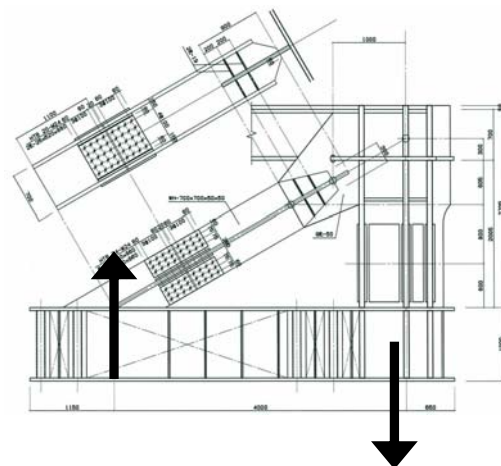
$$= 3890 \text{ kN}$$

次頁の図より、ブレース周囲の固定ボルトは

12本 450 kN/本

より引抜に対する対抗は

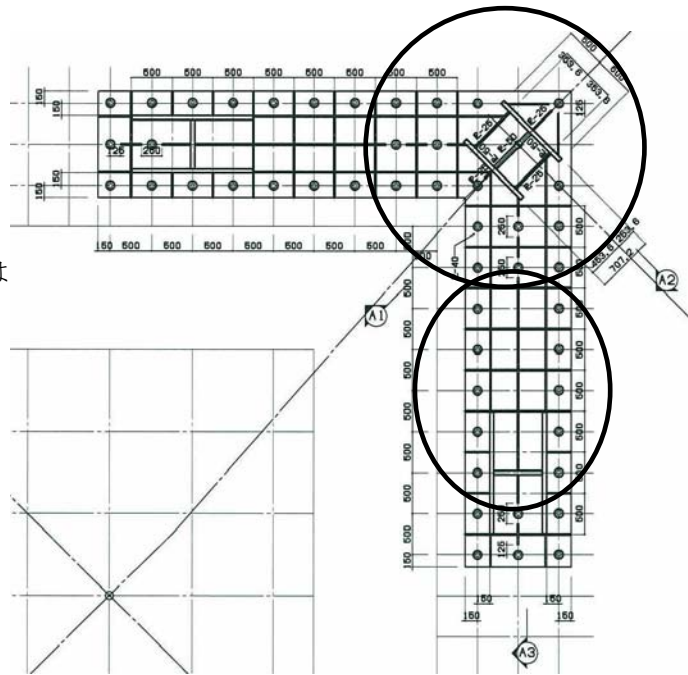
$$12 \times 450 = 5400 \text{ kN}$$



となり、引き抜き力を上回っている。

受け梁支持柱より作用する圧縮力は、
CASE 3 $N = 5756 \text{ kN}$

右図より、ブレース周囲の固定ボルトは
16本 450 kN/本
より、ボルト1箇所あたりに相当する
圧縮力は
 $5756 \text{ kN} / 16 = 360 \text{ kN}$
となり、安全である。



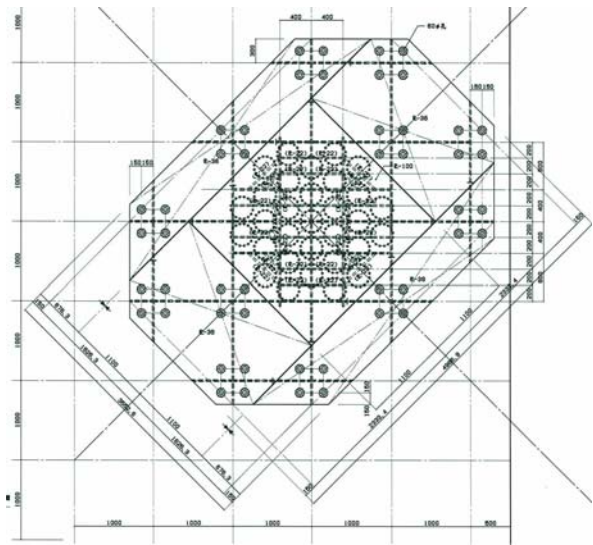
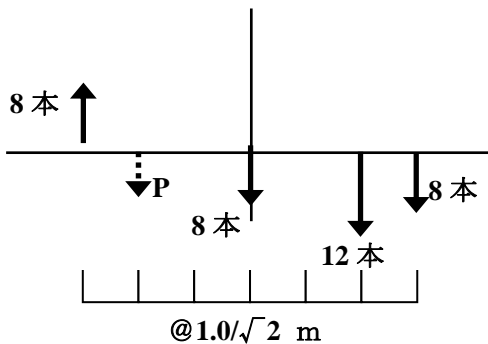
・下部ブロック

下部ブロックに加わる曲げ・軸力は

$$M = 8970 \text{ kNm}$$

$$= 13455 \text{ kNm (衝撃係数考慮)}$$

$$N = 10000 \text{ kN (下向き)}$$



上図のように各ボルト位置にて 450 kN/本 で押さえこむと想定すると、

破線部のボルト位置に位置作用する力は、軸力との釣り合いより、
 $P = 450 \times (8 + 12 + 8 - 8) - 10000 = -1000 \text{ kN}$

このとき発生する転倒に対する抵抗モーメントは

$$M = 450 \times (8 \times 3.0/\sqrt{2} + 12 \times 2.0/\sqrt{2} + 8 \times 3.0/\sqrt{2}) + 1000 \text{ kN} \times 2.0/\sqrt{2}$$

$$= 24324 \text{ kNm}$$

となり、下部ブロック下面に作用する曲げを上回っている。

□ 固定ブロック・下部ブロック水平すべりの検討

解析結果における固定ブロックに加わる水平力が、固定ブロック下面が固定ボルト張力（450 kN）に摩擦係数を0.3とした場合の摩擦力に対してどのような値となっているかを確認する。

・主梁両端柱下部固定ブロック

解析結果より固定ブロックに加わる水平力は

CASE 1 $\text{max } 3597 \text{ kN}$

CASE 2 $\text{max } 4528 \text{ kN}$

固定ボルト本数 22本

$$\begin{aligned} \text{摩擦力} &= 22 \times 450 \text{ kN} \times 0.3 \\ &= 2970 \text{ kN} \end{aligned}$$

ボルト1本あたりの水平力

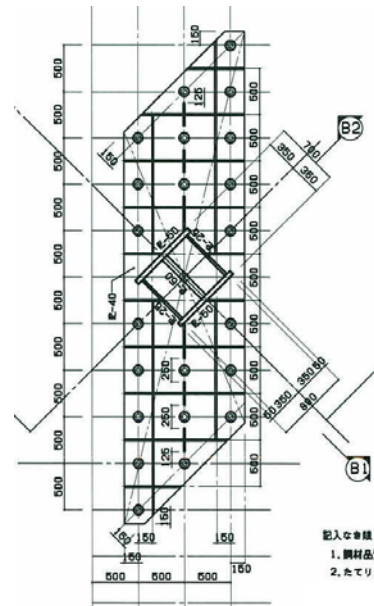
CASE 1 $\text{max } 163.5 \text{ kN}$

CASE 2 $\text{max } 205.8 \text{ kN}$

ボルトのせん断応力度 (M48 14.7 cm^2)

CASE 1 $\text{max } 11.12 \text{ kN/cm}^2$

CASE 2 $\text{max } 14.00 \text{ kN/cm}^2$



・主梁両端柱下部固定ブロック

解析結果より固定ブロックに加わる水平力は

CASE 3 $\text{max } 8651 \text{ kN}$

(CASE 3は衝撃係数1.5を考慮)

固定ボルト本数 48本

$$\begin{aligned} \text{摩擦力} &= 48 \times 450 \text{ kN} \times 0.3 \\ &= 6480 \text{ kN} \end{aligned}$$

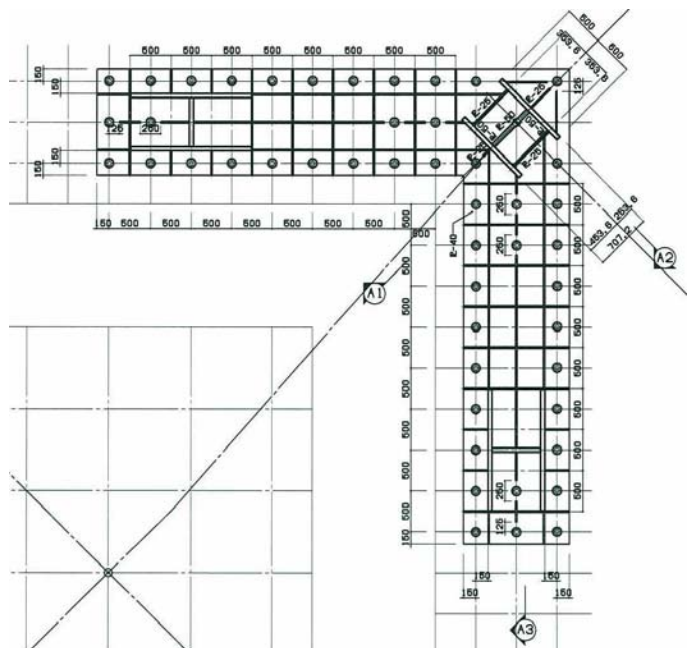
ボルト1本あたりの水平力

CASE 3 $\text{max } 180.2 \text{ kN}$

ボルトのせん断応力度

(M48 14.7 cm^2)

CASE 1 $\text{max } 12.25 \text{ kN/cm}^2$



・下部ブロック

下部ブロックに加わる水平力は

max 6000 kN

衝撃係数 1.5 の場合 max 9000 kN

固定ボルト本数 48本

摩擦力 = $48 \times 450 \text{ kN} \times 0.3$

= 6480 kN

ボルト 1本あたりの水平力

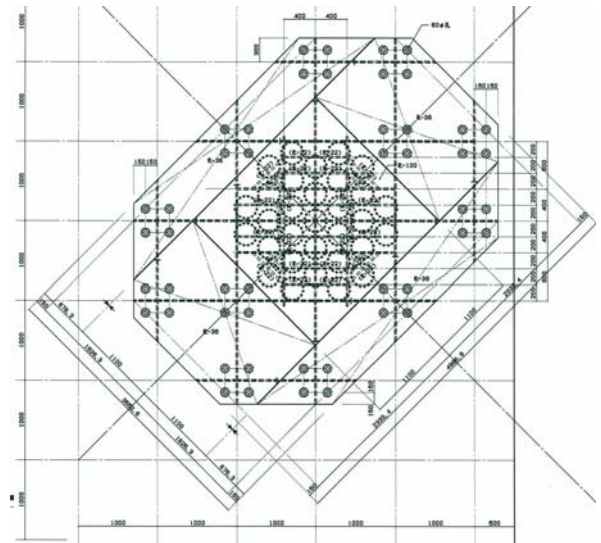
max 125.0 kN

max 187.5 kN (衝撃係数 1.5 を考慮)

ボルトのせん断応力度 (M48 14.7 cm²)

max 8.50 kN/cm²

max 12.76 kN/cm² (衝撃係数 1.5 を考慮)



2.5.4 参考資料

水平・鉛直 2 軸載荷時の分力計荷重分布に関する FEM 解析結果(弾性すべり支承の場合)

水平・鉛直載荷時の分力計荷重分布を検討するため、3次元 FEM 解析を実施した。次頁以後に、下表の条件における弾性すべり支承の解析結果例を示す。解析結果は、各ロードセルの軸力分布と弾性すべり支承の面圧分布を表示している。

表

ケース	鉛直軸力	受梁傾斜	主梁傾斜	水平加力 受梁方向	水平加力 主梁方向	ジャッキ
1	5MN	0	0	—	—	—
2	5MN	1/250	0	—	—	—
3	5MN	1/750+1/1000	0	○	—	—
4	7MN	1/750+1/1000	0	○	—	—
5	7MN	1/750+1/1000	0	○	—	1.5MN
6	0	0	0	—	—	1.5MN
7	7MN	0	0	—	○	—
8	7MN	0	1/1500	—	○	—

ロードセルの圧縮許容軸力は 700kN であり、この数値は解析結果の-140 に相当する。

ロードセルの限界圧縮軸力は 770kN であり、この数値は解析結果の-154 に相当する。

ロードセルの引張許容軸力は 500kN であり、この数値は解析結果の 100 に相当する。

ケース 1

5MN 鉛直載荷した場合で、反力梁に傾斜が無い場合の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース 2

5MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/250 傾斜が生じた場合の解析結果である。受梁は片持ち梁なので必ず傾斜が生じる。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース 3

5MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/750+1/1000 傾斜が生じた場合の受梁方向水平加力時の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。1/750 の傾斜角は、別途実施した反力梁の加力解析結果から評価しており、誤差として 1/1000 を加えている。

ケース 4

7MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/750+1/1000 傾斜が生じた場合の受梁方向水平加力時の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース 5

7MN 鉛直載荷した場合で、反力梁の受梁方向に 1/750+1/1000 傾斜が生じた場合の受梁方向水平加力時の解析結果である。中央部のロードセルをジャッキに置換して 1.5MN の軸力を導入している。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース 6

中央部のロードセルをジャッキに置換して 1.5MN の軸力を導入した場合に、震動台の異常停止等により鉛直軸力が 0 になった場合の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース 7

7MN 鉛直載荷した場合で、反力梁に傾斜が無い場合の主梁方向水平加力時の解析結果である。ロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

ケース 8

7MN 鉛直載荷した場合で、主梁方向水平加力時の解析結果である。反力梁の主梁方向に 1/1500 の傾斜を想定しているが、この場合もロードセル荷重は圧縮許容軸力内に収まっている。

(1) 軸力導入時における反力梁の傾斜の影響

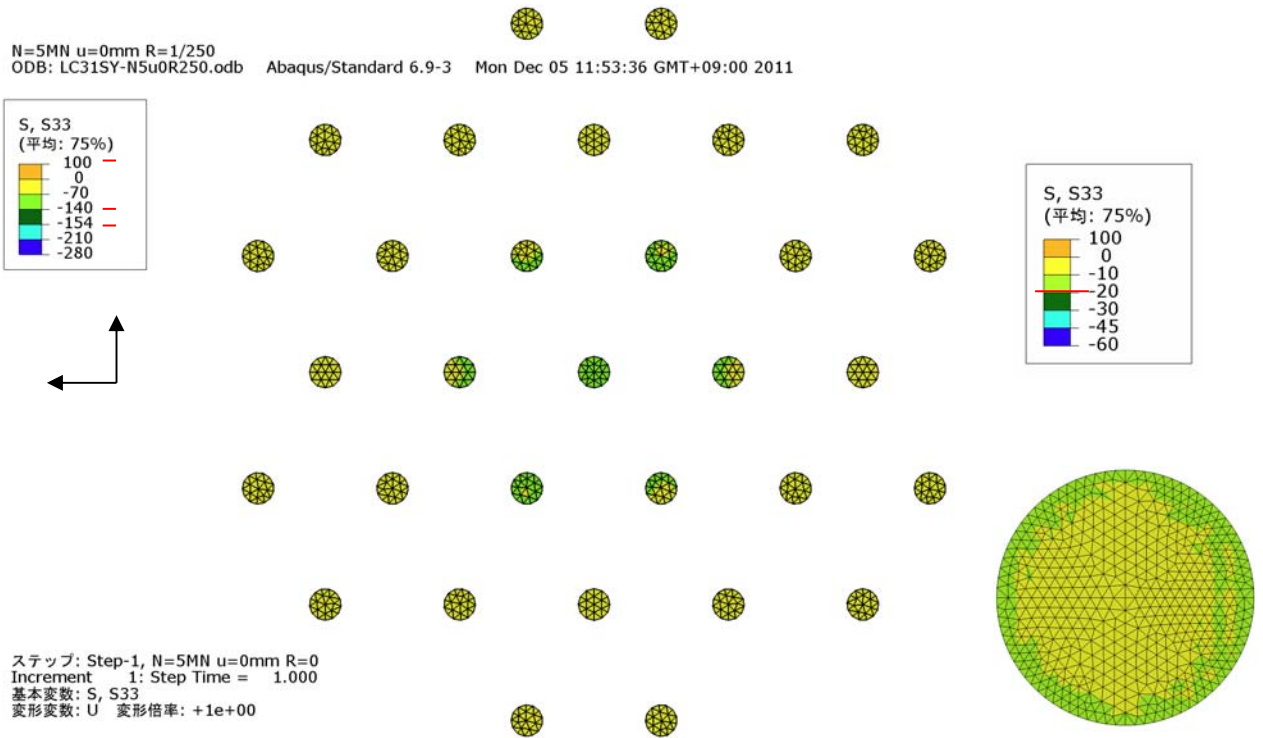


図 1 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(軸力 5MN,初期位置,相対傾斜無)

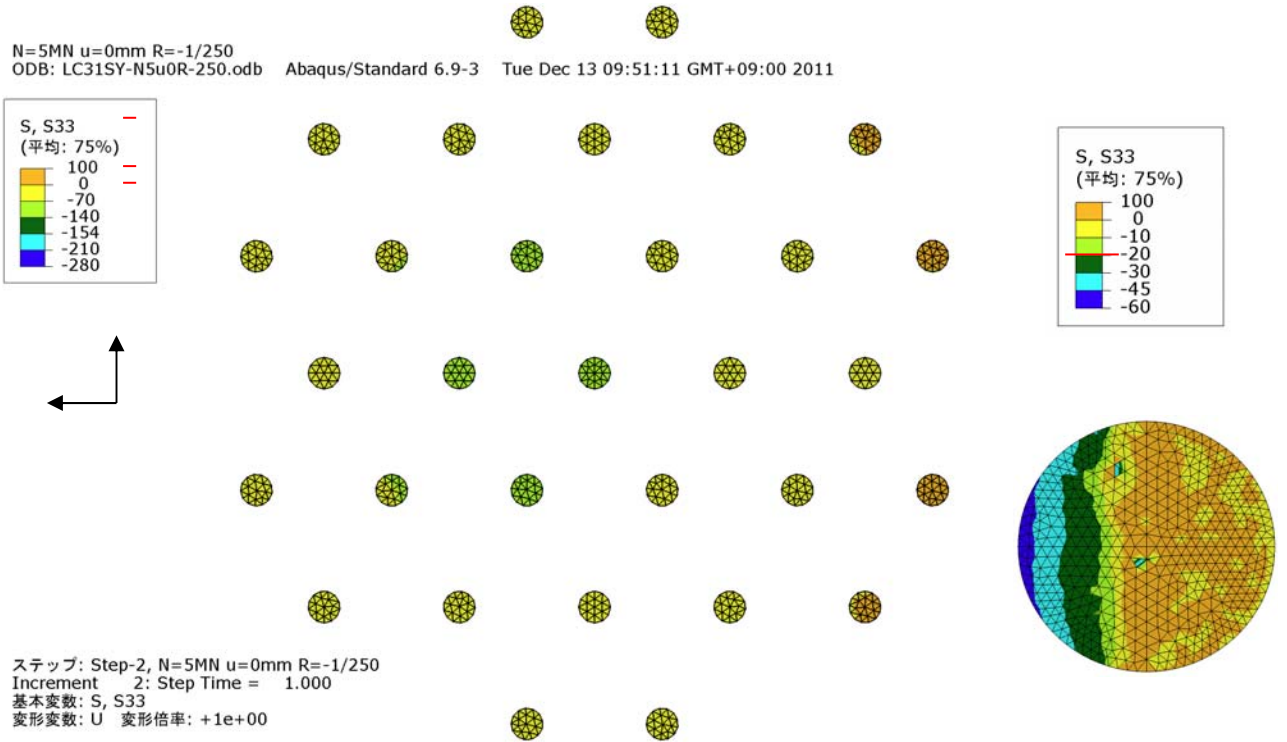


図 2 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(軸力 5MN,初期位置,相対傾斜 1/250)

(2) 受梁方向载荷時の反力梁傾斜の影響

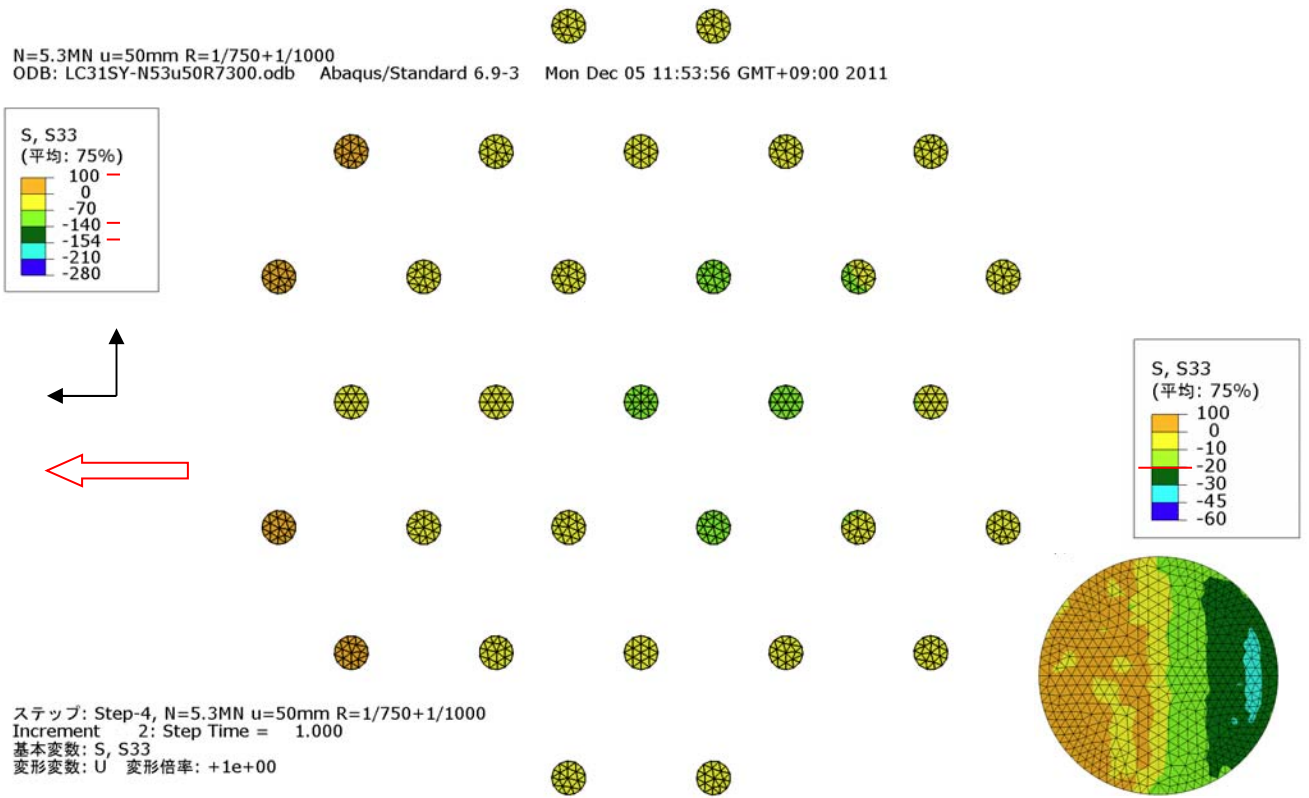


図 3 ロードセル応力分布および接触面圧分布(初期導入軸力 5MN, 滑り領域)

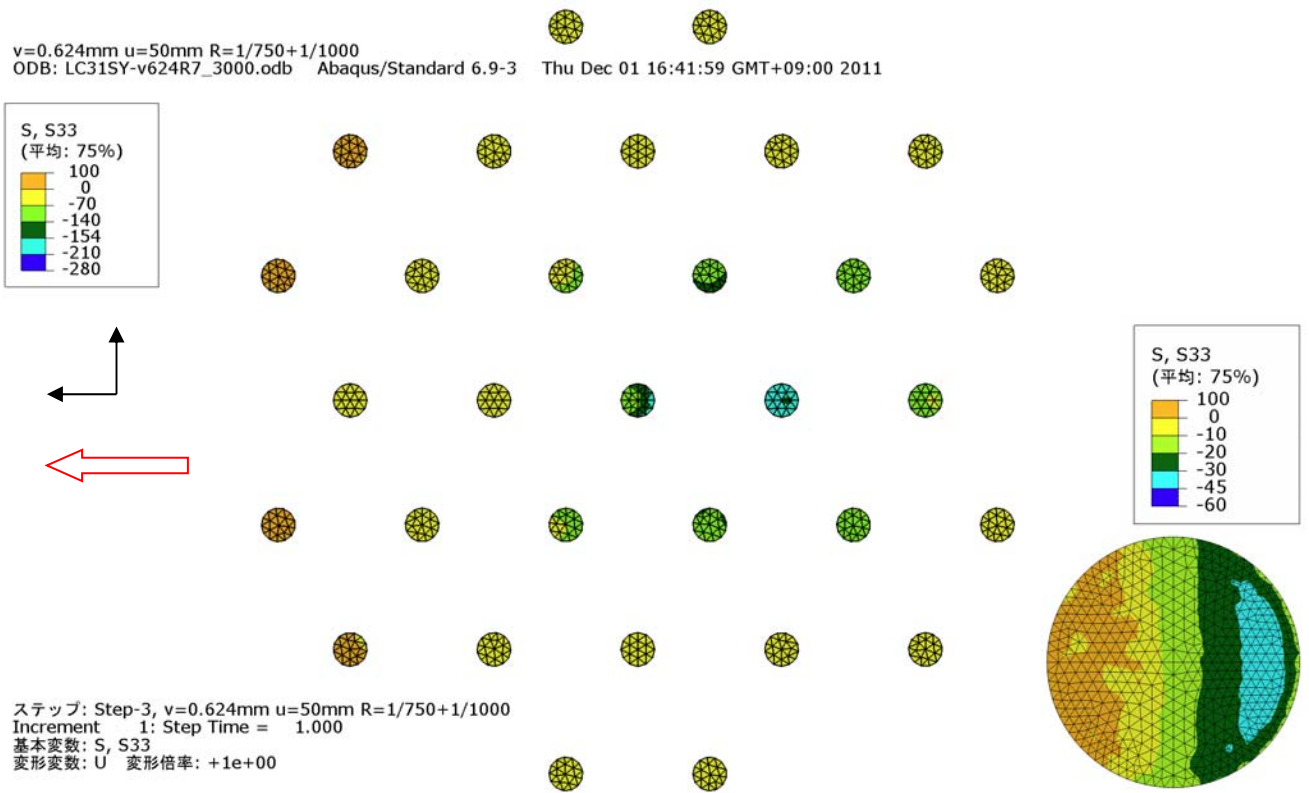


図 4 ロードセル応力分布および接触面圧分布(初期導入軸力 7MN, 滑り領域)

(3) ロードセル1台をジャッキに代替した場合

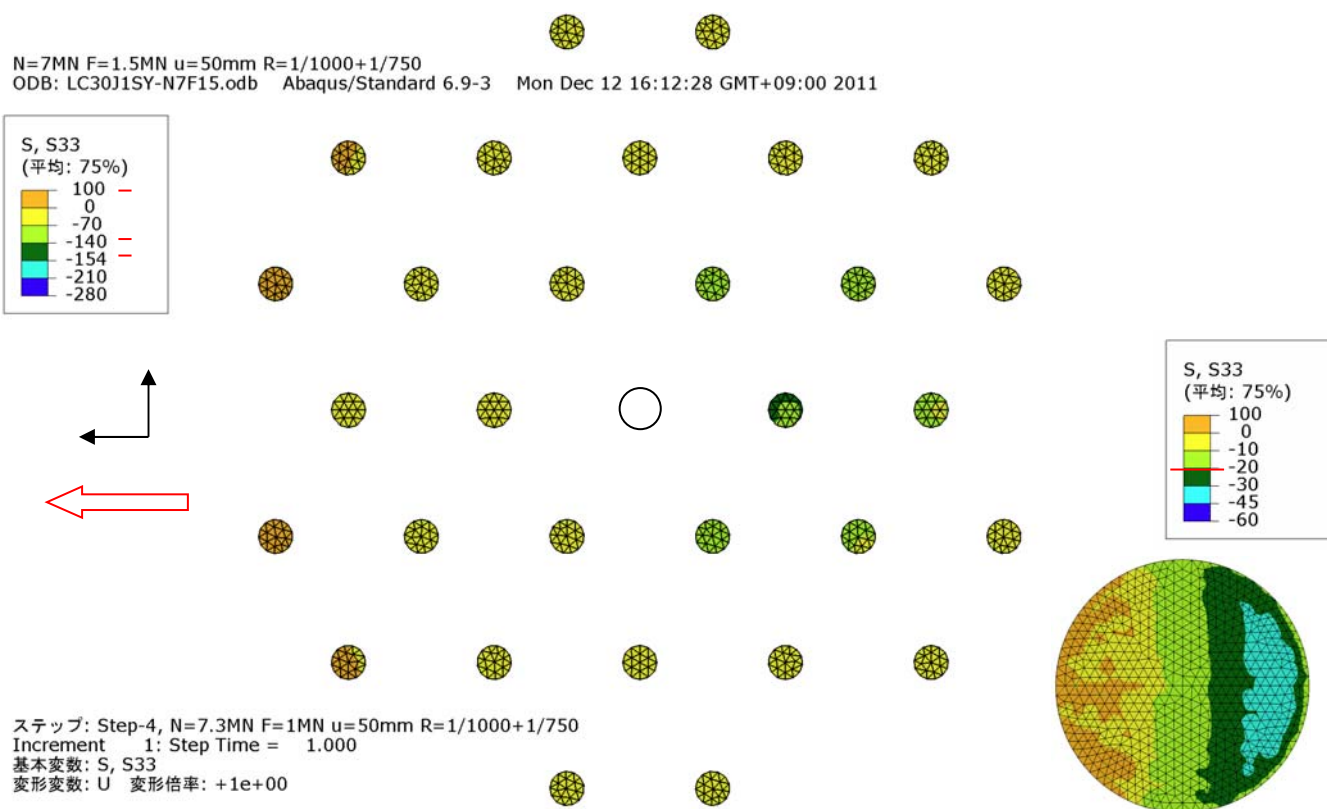


図 5 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN,ジャッキ軸力 1.5MN)

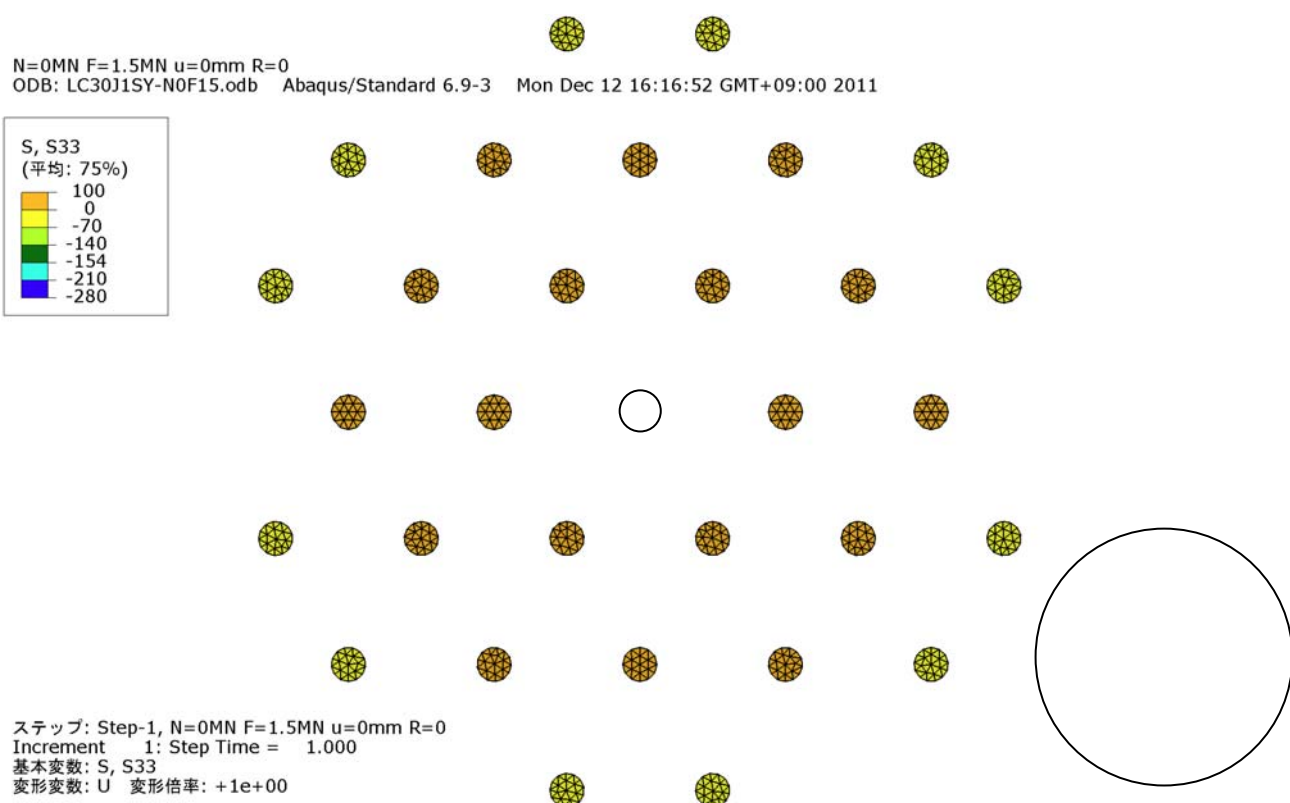


図 6 ロードセル応力分布 (軸力 0N,ジャッキ軸力 1.5MN,緊急停止時)

(4) 主梁方向载荷時の反力梁傾斜の影響

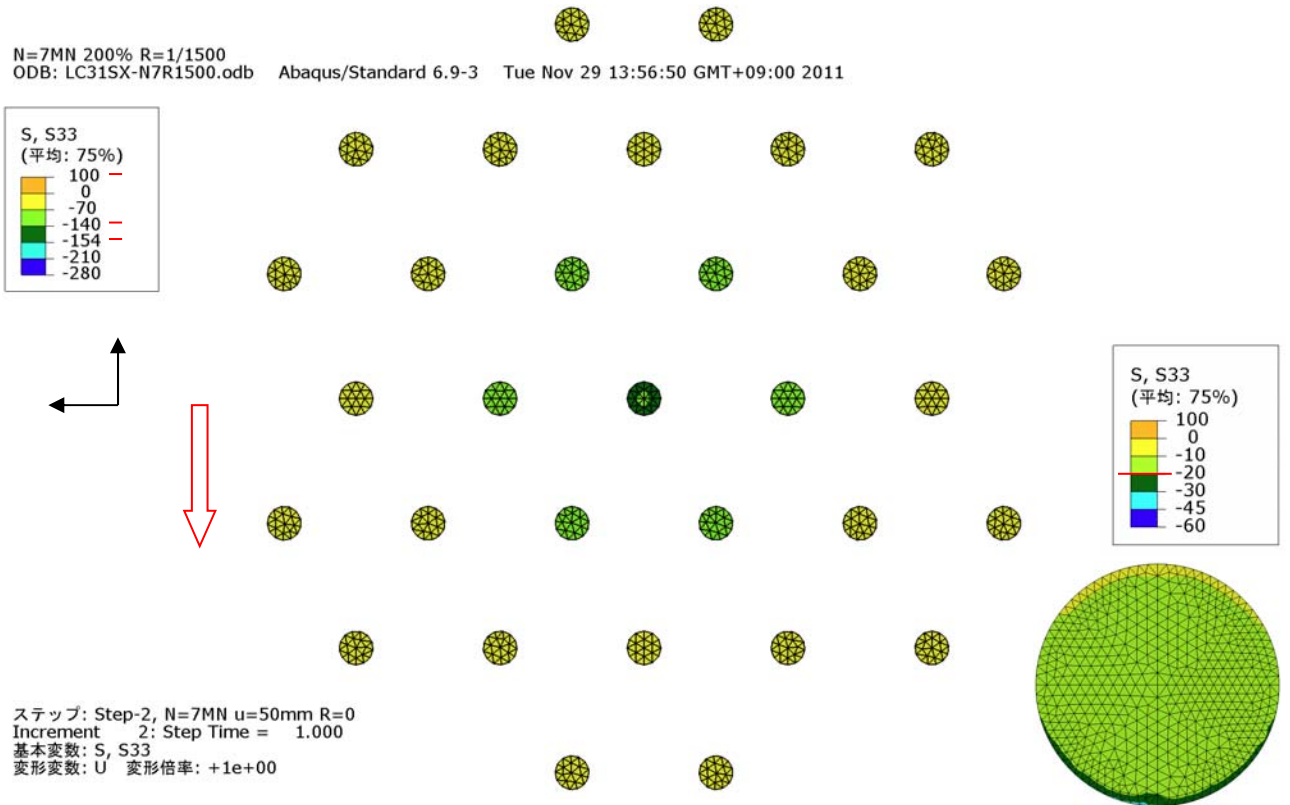


図 7 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN, 滑り領域, 相対傾斜無)

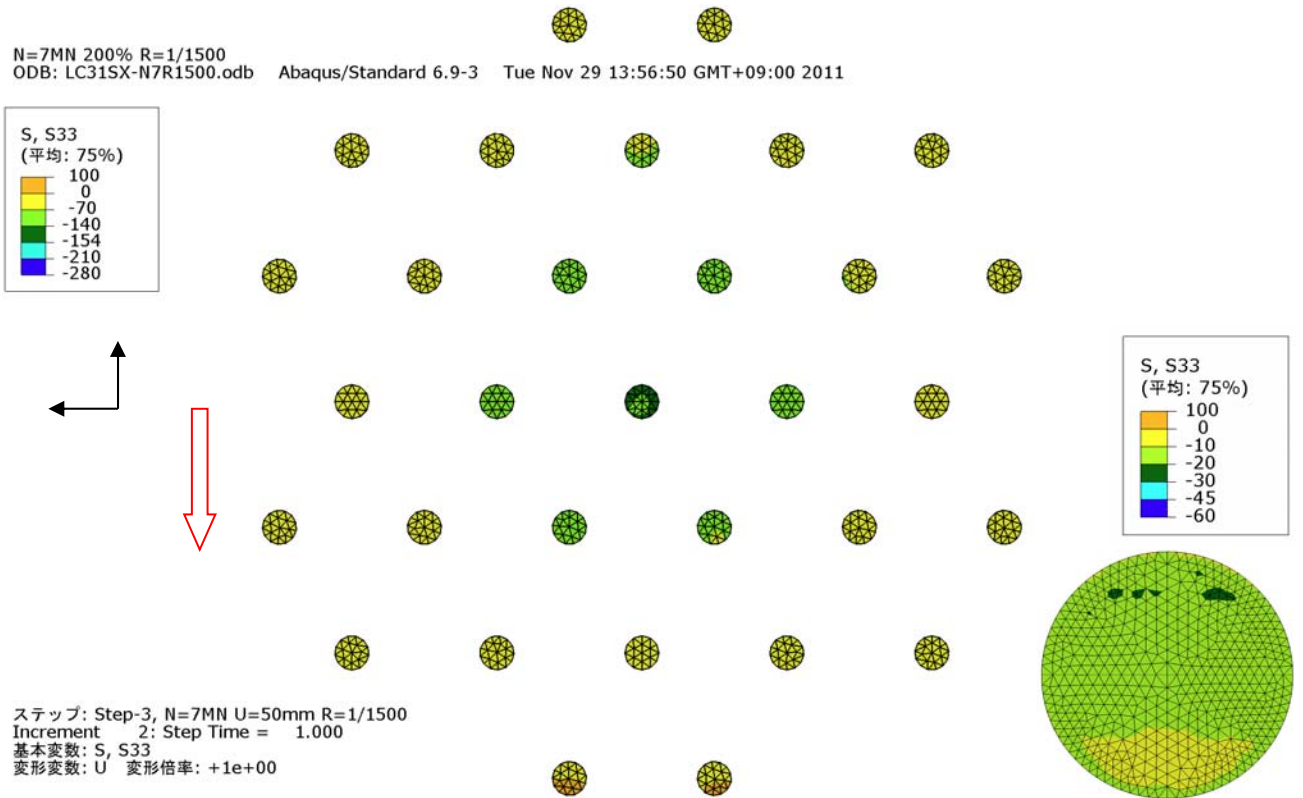
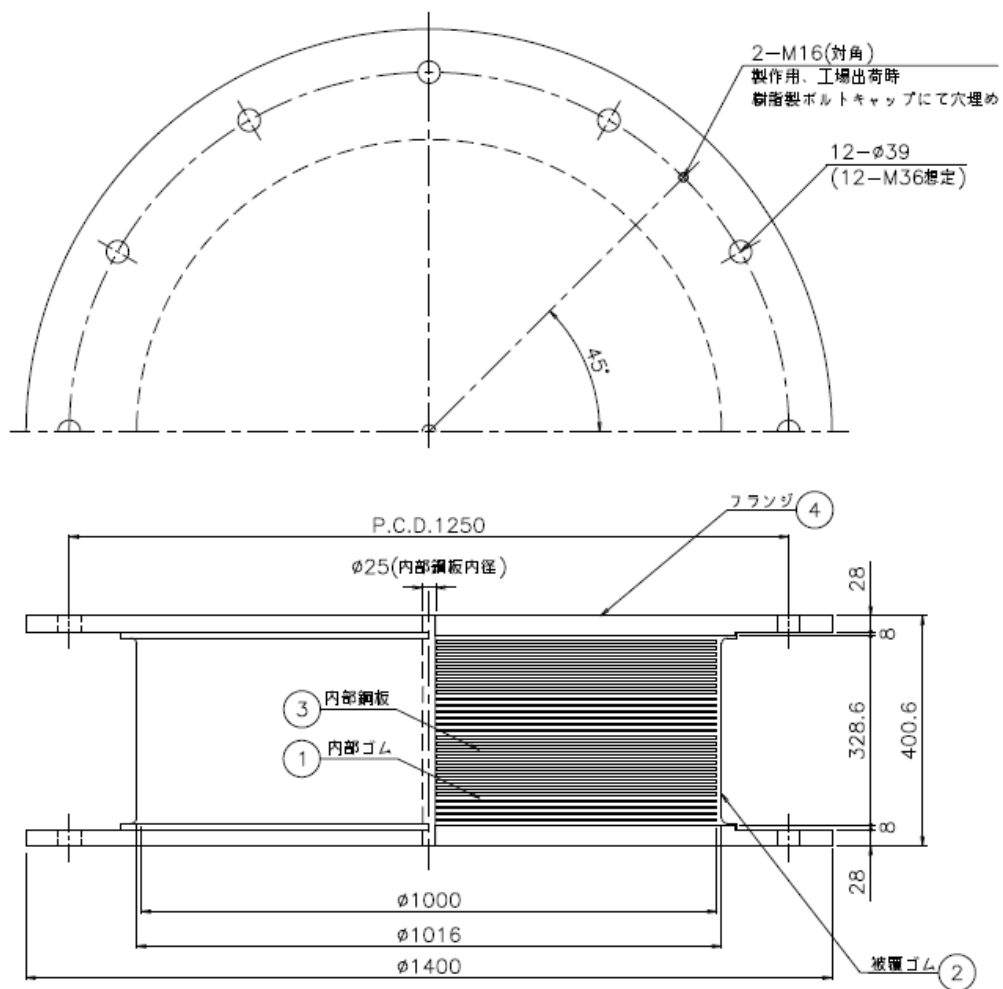


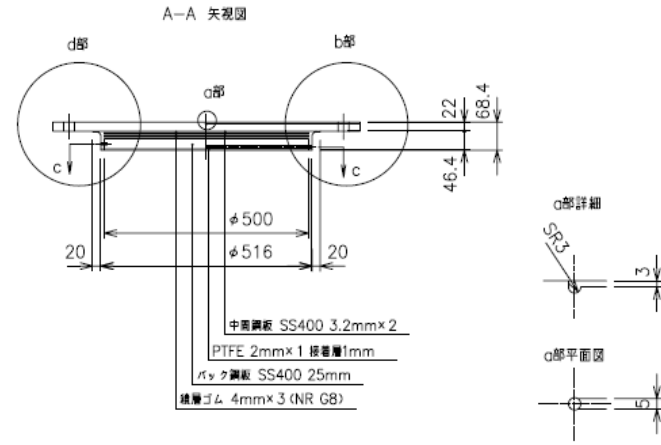
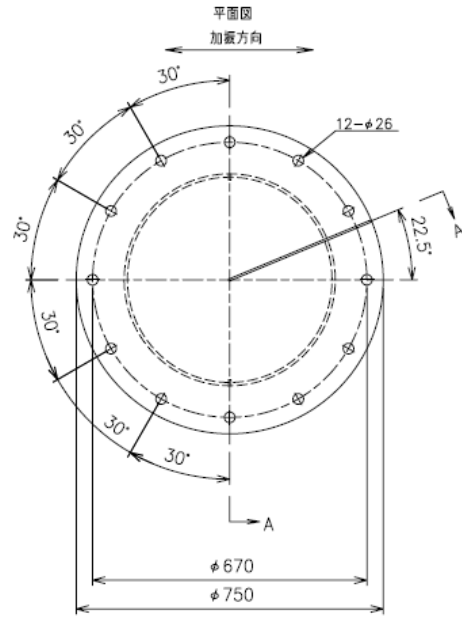
図 8 ロードセル応力分布および接触面面圧分布(初期導入軸力 7MN, 滑り領域, 相対傾斜 1/1500)

2.5.5 参考資料 試験体図面

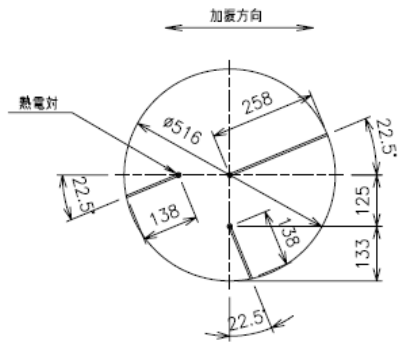


(1) 天然ゴム系積層ゴム

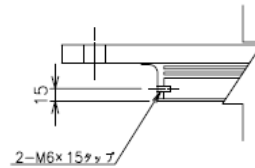
弾性すべり支承(φ500) NR



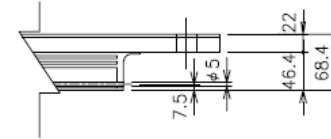
バック鋼板(熱電対を挿入する穴)
c-c平面図



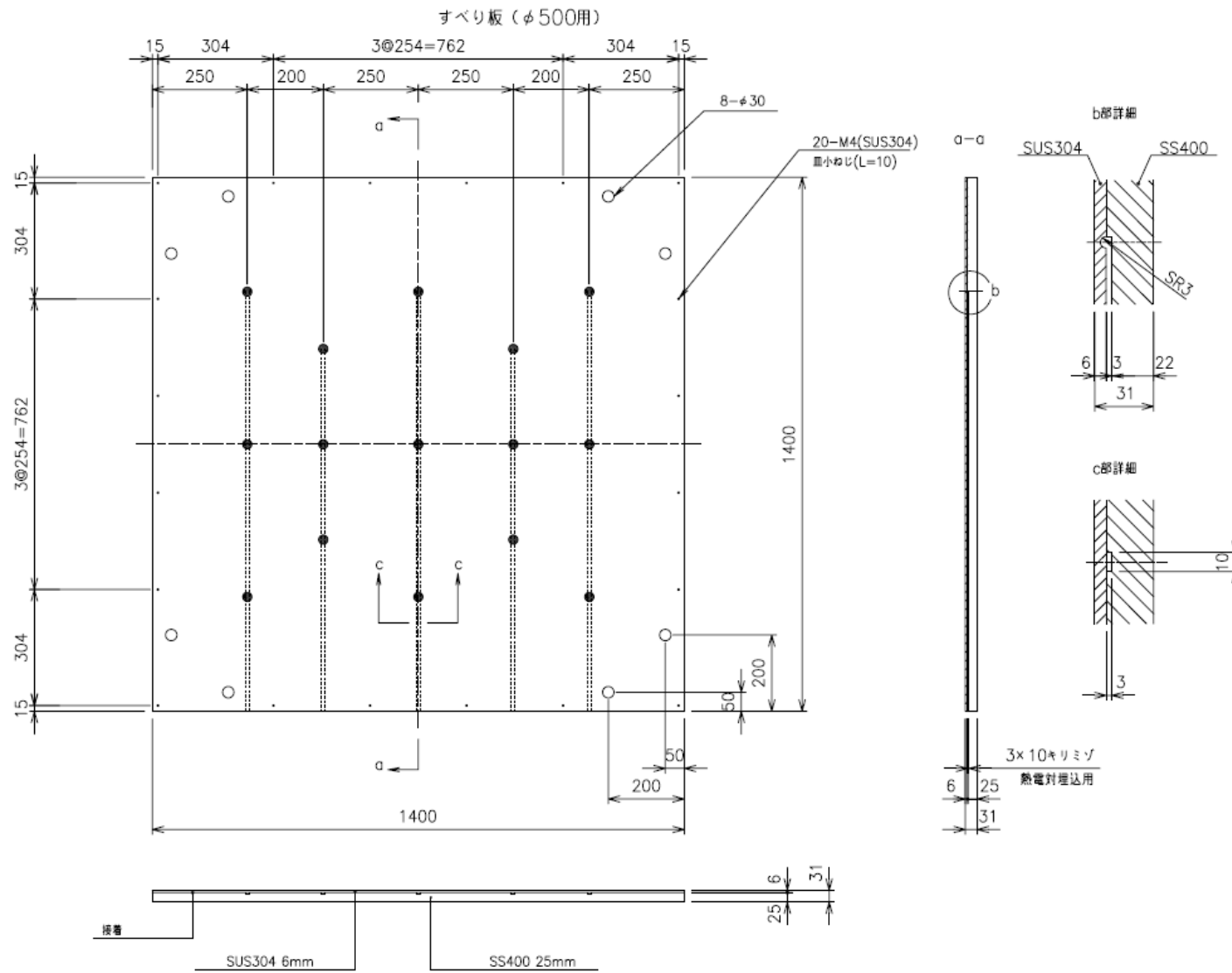
d部平面図



b部平面図

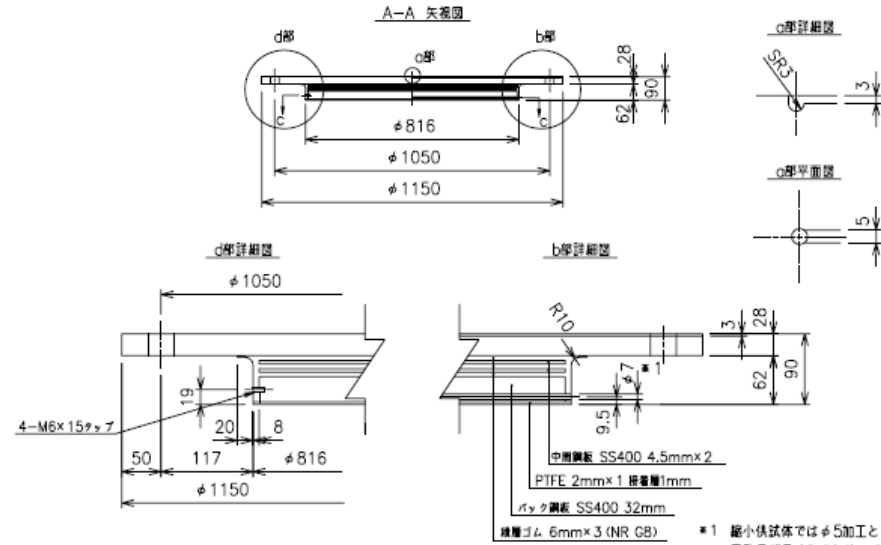
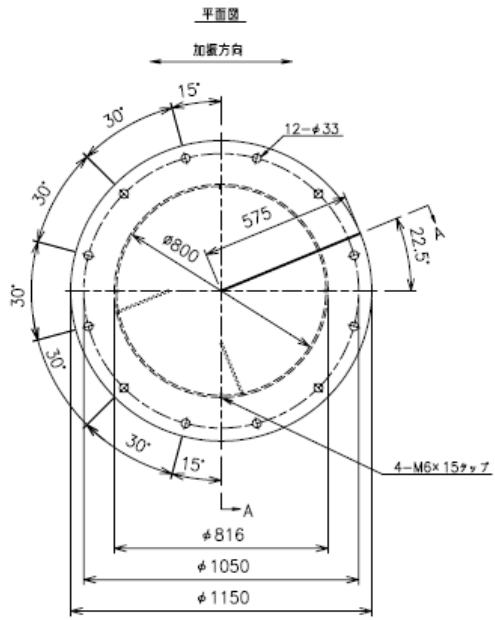


(2a) 弾性すべり支承 (高摩擦) φ500

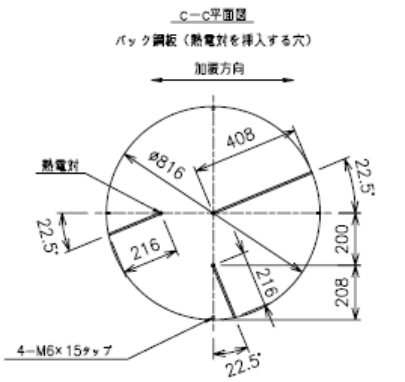


(2b) すべり板 φ500用

弾性すべり支承(φ800) NR



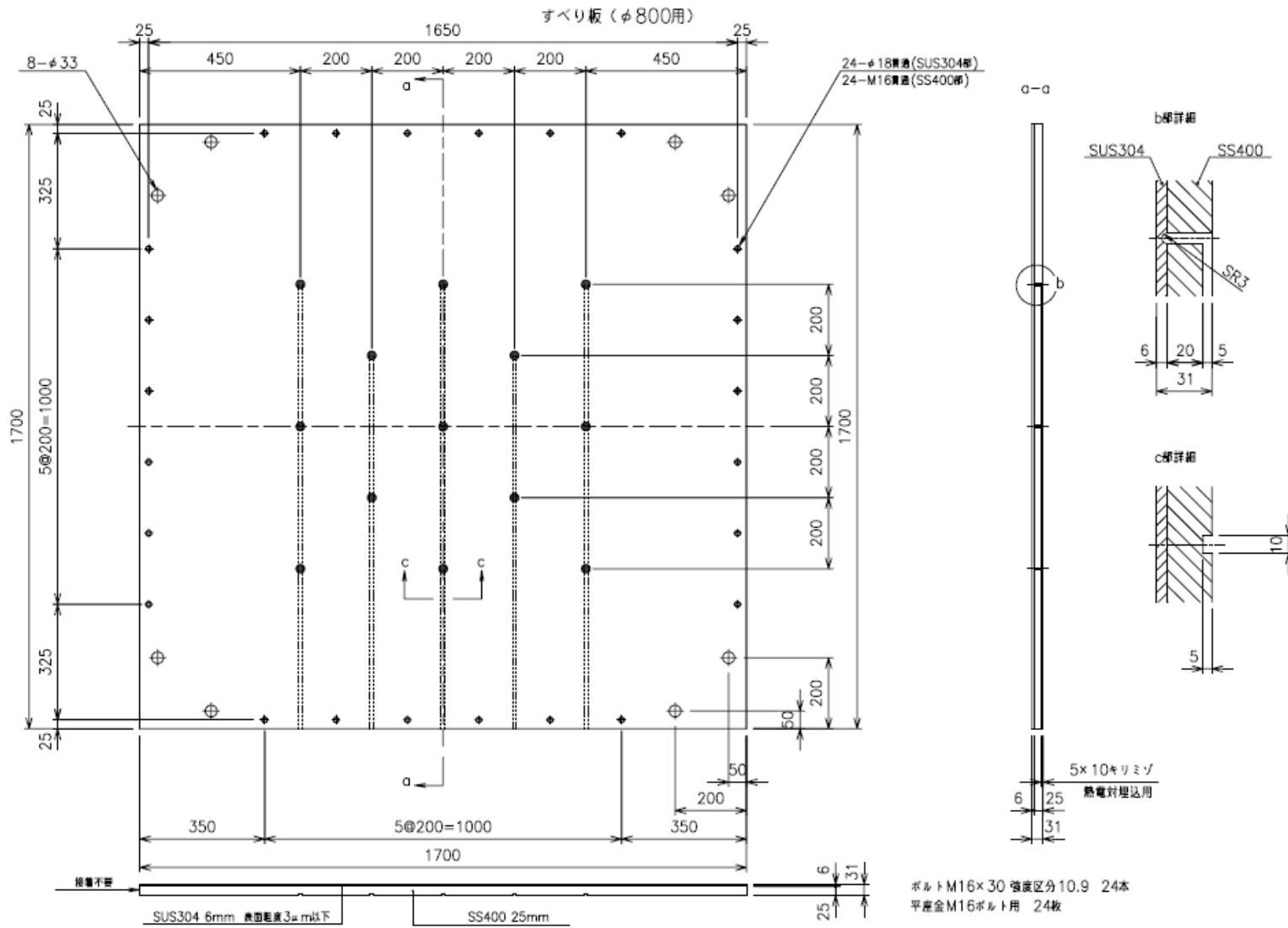
※1 縮小体試体ではφ5加工としたが、穿孔長が長くなるため、φ7に変更。



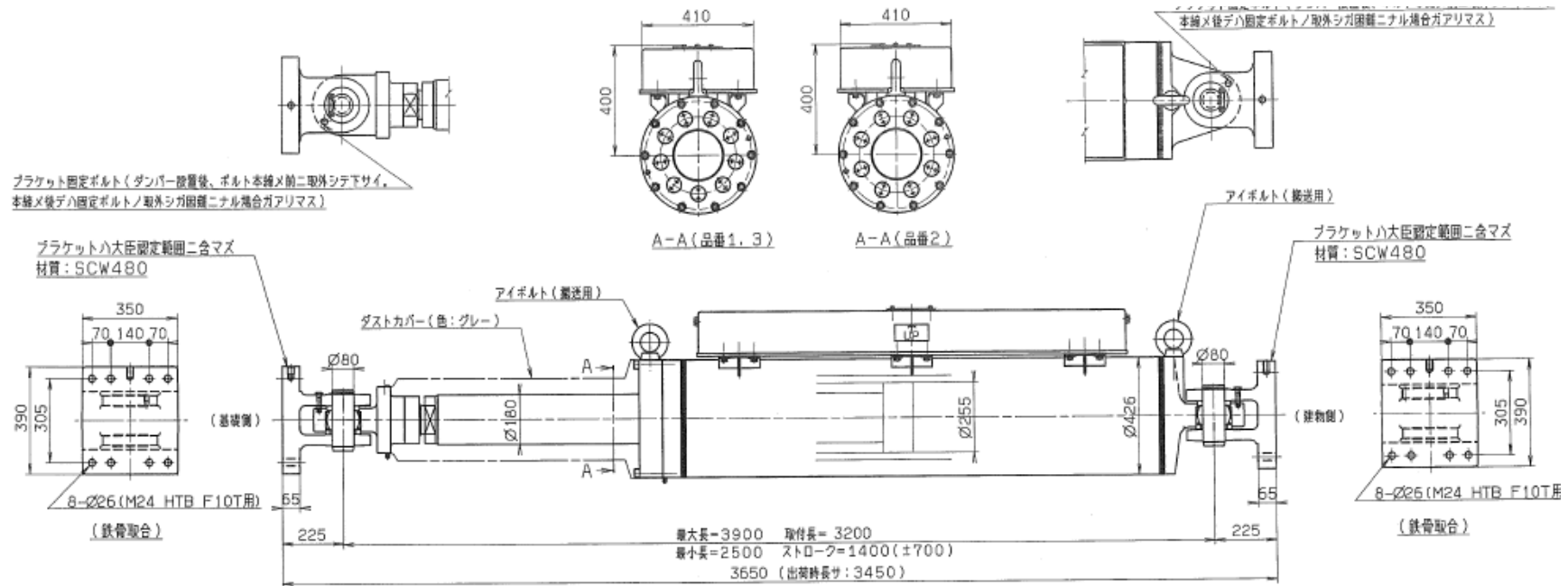
※2 c-c平面図において、熱電対を挿入する穴の位置に注意すること。

組合 No.	部 品 名	材 質	個 数	質量 [kg]
	合計			403.9kg
5	中鋼鋼板	SS400	1	35.5kg
4	積層ゴム	NR	1	11.3kg
3	バック鋼板	SS400	1	126.3kg
2	すべり材	PTFE	1	2.5kg
1	フランジ	SS400	1	228.3kg

(3a) 弾性すべり支承 (高摩擦) φ800



(3b) すべり板 φ800用



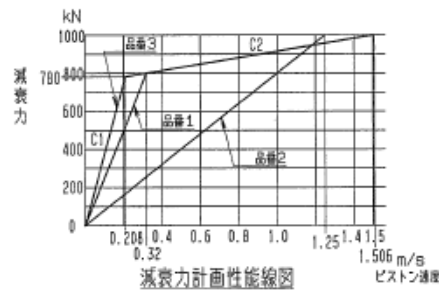
1.仕様

品番	1	2	3
形式	BM250-4C	BM250-6C	BM250
減衰力タイプ	バイリニア	リニア	バイリニア
1次減衰係数(C1) MN・s/m	2.5	0.8	3.75
2次減衰係数(C2) MN・s/m	0.1695	-	0.1695
リリース速度 m/s	0.32	-	0.208
リリース減衰力 kN	800	-	780
最大速度 m/s	1.50	1.25	1.506
最大減衰力 kN	1000	1000	1000

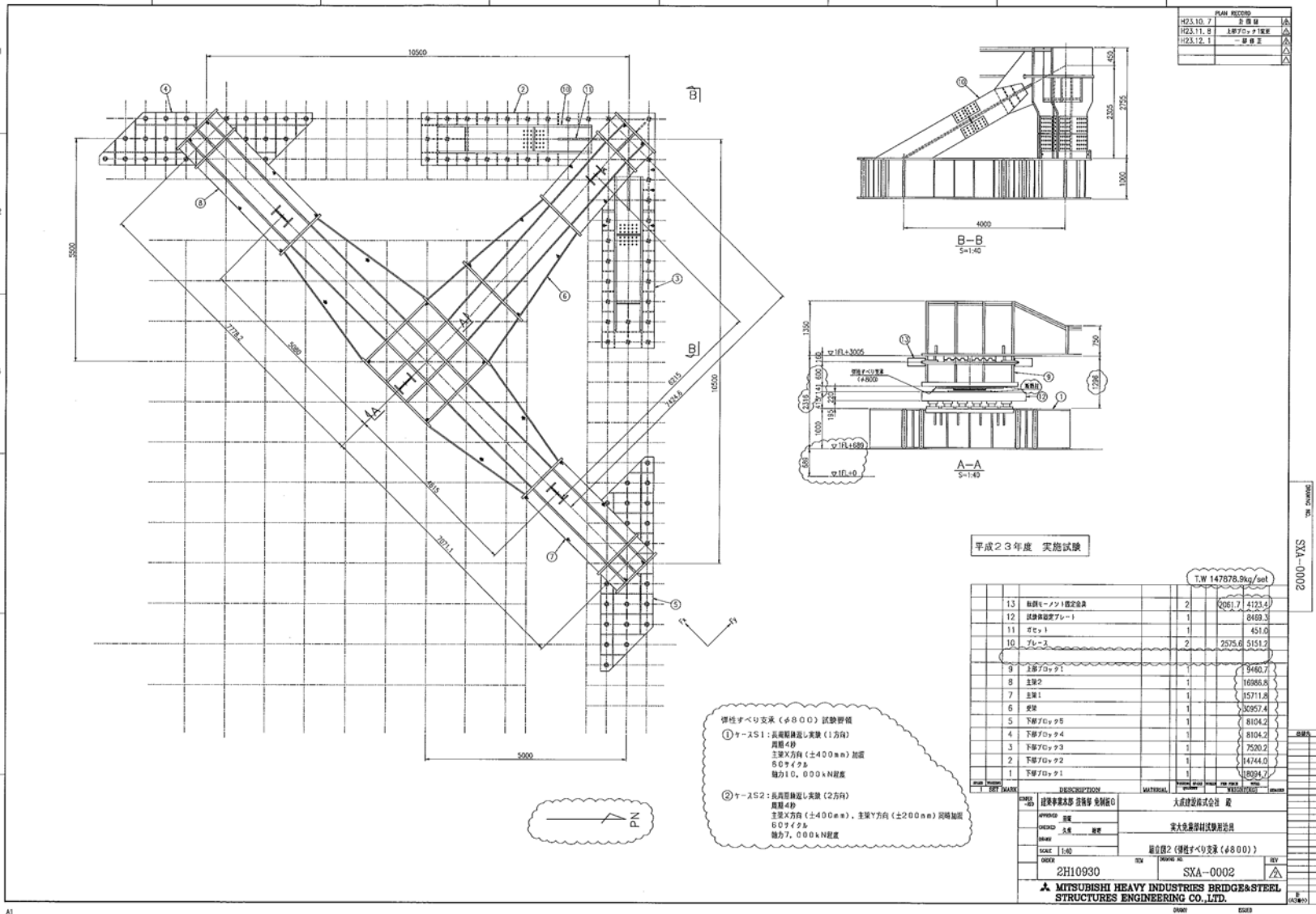
2. 外表 : 下塗 JIS K5674 鉛・クロムフリーサビ止めペイント 1回塗り
 : 上塗 JIS K5572 フタル酸樹脂エナメル 1回塗り

注記

1. 本オイルダンパーハタンク上側ニシテ取付ケノコト。
2. オイルダンパーラストップバシテ使用セヌコト。
3. 本オイルダンパーノ外形部ハ、強度上有害トナラズ範囲デ黒皮マタハ素材素地面トシ、適正ナ塗装ヲ行ウ。



(4) オイルダンパー



PLAN RECORD		
H23.10.7	計画書	△
H23.11.8	主桁70×718鋼	△
H23.12.1	鋼橋	△

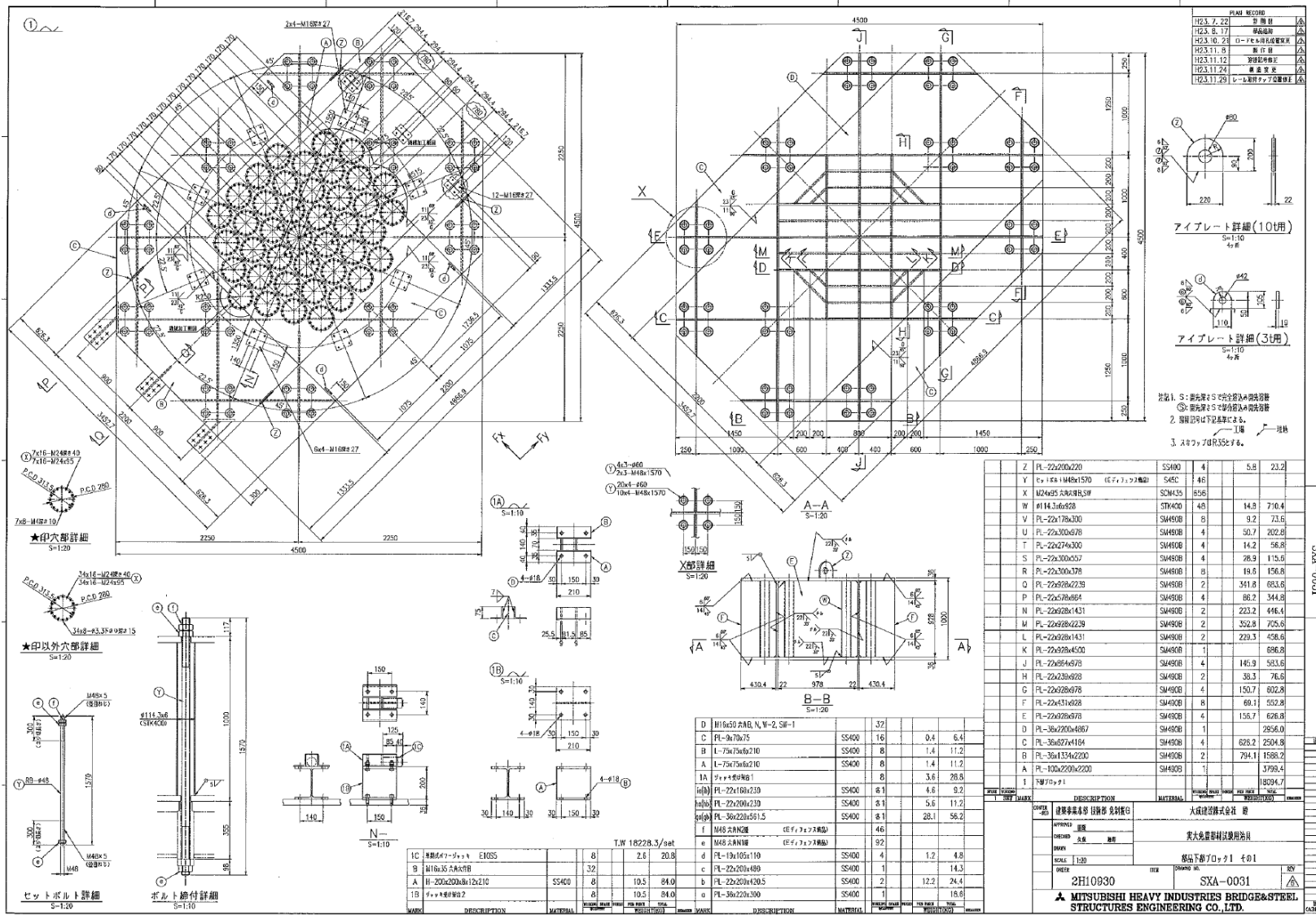
平成23年度 実施試験

T.W 147878.9kg/set			
13	転倒モーメント固定金具	2	2061.7 4123.4
12	試験体固定プレート	1	8459.3
11	プレート	1	451.0
10	プレート	2	2575.6 5151.2
9	上桁70×71	1	3460.7
8	主桁2	1	16956.8
7	主桁1	1	15711.8
6	横梁	1	30957.4
5	下桁70×75	1	8104.2
4	下桁70×74	1	8104.2
3	下桁70×73	1	7520.2
2	下桁70×72	1	14744.0
1	下桁70×71	1	14294.7

鋼性すべり支床 (φ800) 試験仕様
 ① T-S1: 長編絡繰り試験 (1方向)
 試験4秒
 主梁X方向 (±400mm) 加振
 60Hz程度
 軸力10,000kN程度
 ② T-S2: 長編絡繰り試験 (2方向)
 試験4秒
 主梁X方向 (±400mm)、主梁Y方向 (±200mm) 同時加振
 60Hz程度
 軸力7,000kN程度

DESIGNER	建設学専攻 佐藤孝 免状番号	MATERIAL	大東建設株式会社 製
APPROVED	佐藤 孝	TEST METHOD	実大免状部材試験部 法
DATE	2023.12.1	TEST RESULT	適合品2 (鋼性すべり支床 (φ800))
SCALE	1/40	REV	2H10930 SXA-0002
OWNER	2H10930	REV	SXA-0002
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES BRIDGE&STEEL STRUCTURES ENGINEERING CO., LTD.			

DRAWING NO. SXA-0002



PLAN RECORD

12.3.7.22	図面	△
12.3.9.17	確認	△
12.3.10.21	ローパス補正	△
12.3.11.8	修正	△
12.3.11.12	図面修正	△
12.3.11.24	修正	△
12.3.11.29	レスポンス確認	△

アイプレート詳細 (10用)
S=1:10
4号

アイプレート詳細 (3用)
S=1:10
4号

注記 1. S: 断面2と5で完全な入力係数
3: 断面2と5で完全な入力係数
2. 詳細図は下図を参照せよ。1: 埋め
3. スナップリブはSに示す。

品名	数量	単位	寸法	重量
Z PL-22x20x220	55400	4	5.8	23.2
Y PL-15x148x1570 (CF, 3ヶ所)	546	4		
X M24x35 六角ボルト	SCM435	856		
W #14.3x6x28	SM490B	4	14.8	710.4
V PL-22x178x300	SM490B	8	9.2	23.6
U PL-22x300x378	SM490B	4	50.7	202.8
T PL-22x274x300	SM490B	4	14.2	56.8
S PL-22x300x307	SM490B	4	28.9	115.6
R PL-22x300x378	SM490B	8	19.6	156.8
Q PL-22x378x223.9	SM490B	2	341.8	683.6
P PL-22x378x664	SM490B	4	86.2	344.8
N PL-22x288x1431	SM490B	2	223.2	446.4
M PL-22x288x223.9	SM490B	2	352.8	705.6
L PL-22x288x1431	SM490B	2	229.3	458.6
K PL-22x378x450	SM490C	1		686.8
J PL-22x378x478	SM490B	4	146.9	583.6
H PL-22x378x628	SM490B	2	36.3	76.6
G PL-22x378x678	SM490B	4	150.7	602.8
F PL-22x431x628	SM490B	8	69.1	552.8
E PL-22x378x678	SM490B	4	156.7	626.8
D PL-22x200x485	SM490B	1		2850.0
C PL-36x574x184	SM490B	4	628.2	2504.8
B PL-36x1334x220	SM490B	2	794.1	1588.2
A PL-100x220x220	SM490C	1		5709.4
T 埋め				10294.7
合計				25247.7

品名	数量	単位	寸法	重量
D M16x50 六角ボルト, N, W-2, SIF-1	SS400	32		
C PL-9x70x75	SS400	16	0.4	6.4
B PL-75x75x6x210	SS400	8	1.4	11.2
A PL-75x75x6x210	SS400	8	1.4	11.2
1A 4ヶ所		8	3.6	28.8
1b PL-22x16x230	SS400	8	4.6	36.8
1c PL-22x20x230	SS400	8	5.6	44.8
1d PL-36x22x561.5	SS400	8	28.1	224.8
e M48 六角ボルト (CF, 3ヶ所)		46		
f M48 六角ボルト (CF, 3ヶ所)		92		
d PL-19x105x110	SS400	4	1.2	4.8
c PL-22x20x489	SS400	1		14.3
b PL-22x20x420.5	SS400	2	12.2	24.4
a PL-36x22x300	SS400	1		18.8

品名	数量	単位	寸法	重量
1C 基礎コンクリート E100S		8	2.6	20.8
9 M16x35 六角ボルト		32		
A H-22x200x815x210	SS400	8	10.5	84.0
1B 4ヶ所		8	10.5	84.0

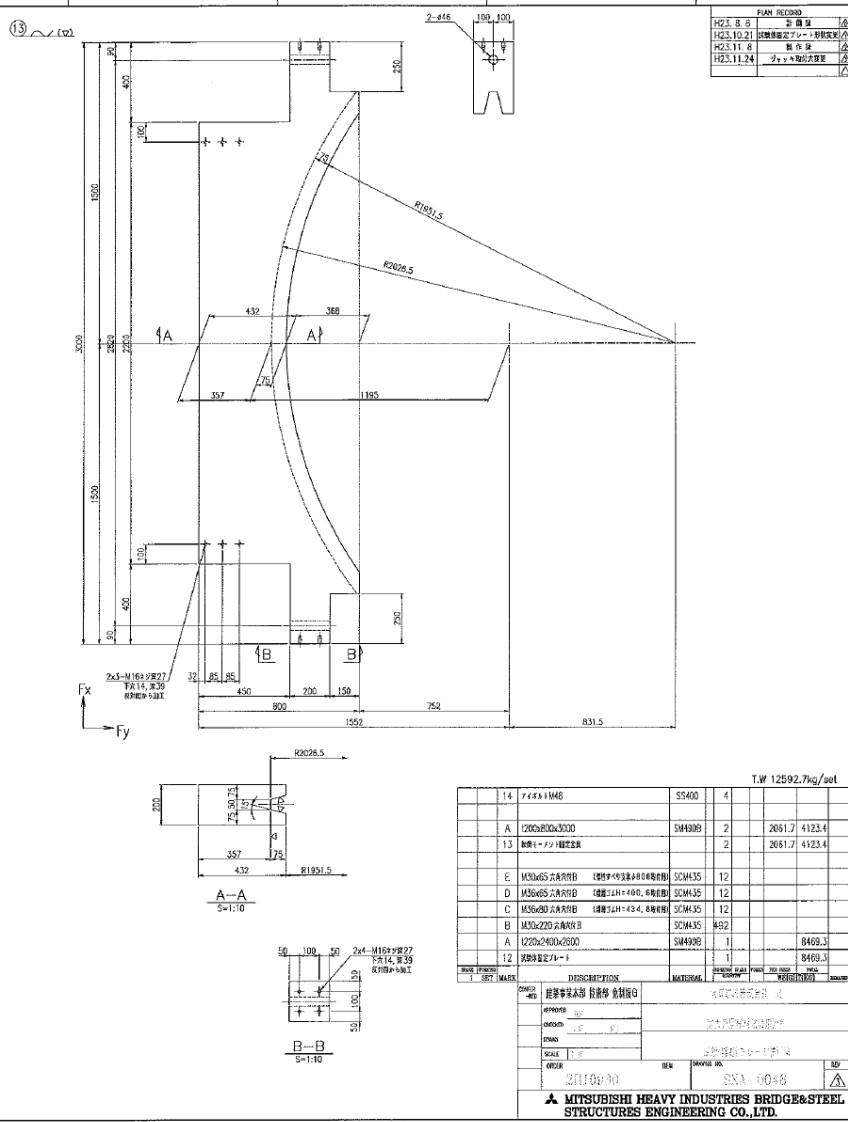
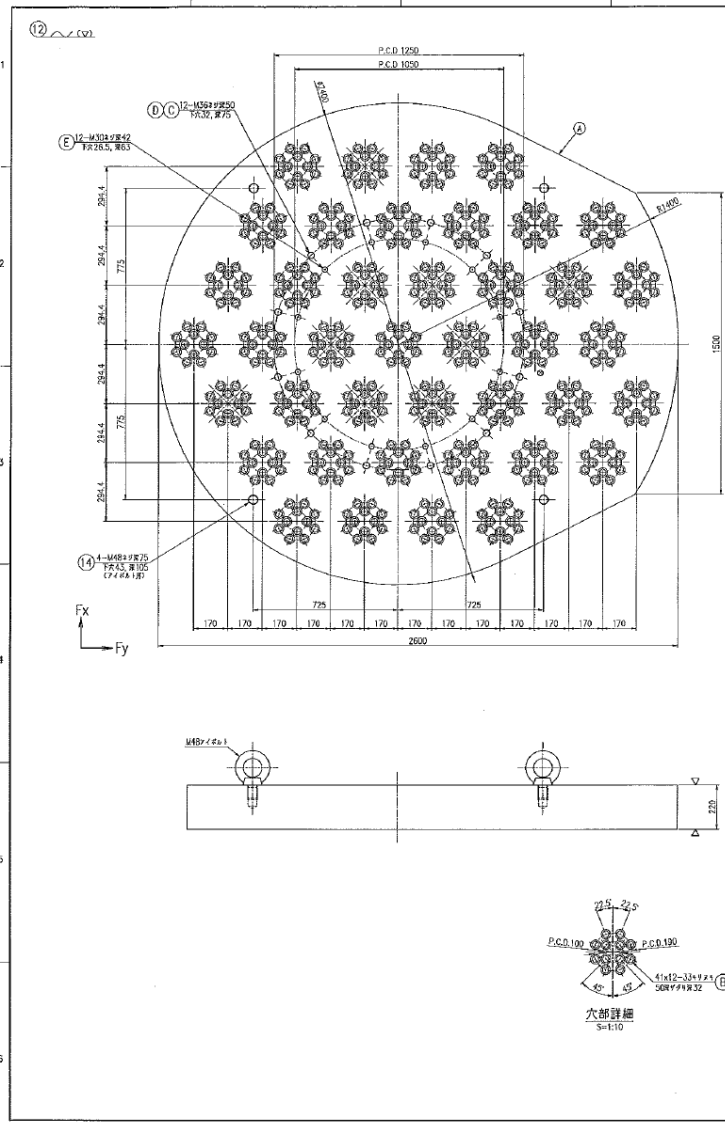
T.W 18228.3/set

品名	数量	単位	寸法	重量
d PL-19x105x110	SS400	4	1.2	4.8
c PL-22x20x489	SS400	1		14.3
b PL-22x20x420.5	SS400	2	12.2	24.4
a PL-36x22x300	SS400	1		18.8

2H10930 SXA-0031
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES BRIDGE & STEEL STRUCTURES ENGINEERING CO., LTD.

SXA-0031

IV-2.5.6-4



PLAN RECORD	
H23.8.0	計画書
H23.10.21	図面修正シート-初版発行
H23.11.8	製作書
H23.11.24	作業手配書

		T.W 12592.7kg/soot	
14	7x4x1M46	SS400	4
A	1200x800x3000	SM490B	2
13	鋼材-ソリ補強鉄筋		2
E	M10@65 2本x900	SM435	12
D	M10@65 2本x900	SM435	12
C	M10@80 2本x900	SM435	12
B	M10@220 2本x900	SM435	402
A	1220x2400x2500	SM490B	1
12	穴部補強鉄筋		1

NO.	DESCRIPTION	MATERIAL	QUANTITY	UNIT	REMARKS
1	1000x1000	SM490B	1	個	

設計者: 住友重工業株式会社 技術部 橋梁部 G
 校核者: 橋梁部 橋梁課長
 承認者: 橋梁部 部長
 日付: 2023.11.24
 図面番号: SNA-0046
 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES BRIDGE & STEEL STRUCTURES ENGINEERING CO., LTD.

2.5.7 参考資料 計測計画詳細

表 2.A7-1 計測チャンネル表 (震動台収録システム：弾性すべり支承試験体)

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名
1	速度	震動台	VTC-x	X	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
2	速度	震動台	VTC-y	Y	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
3	速度	震動台	VTC-z	Z	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
4	速度	震動台	VTN-z	Z	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
5	速度	震動台	VTW-z	Z	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
6	速度	下部ブロック	VBO-u	U	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
7	速度	下部ブロック	VBO-v	V	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
8	速度	下部ブロック	VBO-z	Z	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
9	速度	反力フレーム 主梁	VG0-u	U	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
10	速度	反力フレーム 主梁	VG0-v	V	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
11	速度	反力フレーム 主梁	VG0-z	Z	サーボ型速度計 VSE-15-G 200kine
12	加速度	反力フレーム 主梁	AG0-u	U	歪型加速度計 AS-100HB 100G
13	加速度	反力フレーム 主梁	AG0-v	V	歪型加速度計 AS-100HB 100G
14	加速度	反力フレーム 主梁	AG0-z	Z	歪型加速度計 AS-100HB 100G
15	加速度	反力フレーム 主梁	AG1-z	Z	歪型加速度計 AS-100HB 100G
16	加速度	反力フレーム 主梁	AG2-z	Z	歪型加速度計 AS-100HB 100G
17	加速度	反力フレーム 受梁	AG3-z	Z	歪型加速度計 AS-100HB 100G
18	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC1a-z	Z	歪ゲージ 単軸
19	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC1b-z	Z	歪ゲージ 単軸
20	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC2a-z	Z	歪ゲージ 単軸
21	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC2b-z	Z	歪ゲージ 単軸
22	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	SC3a-z	Z	歪ゲージ 単軸
23	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	SC3b-z	Z	歪ゲージ 単軸
24	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1a-u	U	歪ゲージ 単軸
25	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1b-u	U	歪ゲージ 単軸
26	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1c-u	U	歪ゲージ 単軸
27	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1d-u	U	歪ゲージ 単軸
28	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2a-u	U	歪ゲージ 単軸
29	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2b-u	U	歪ゲージ 単軸
30	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2c-u	U	歪ゲージ 単軸
31	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2d-u	U	歪ゲージ 単軸
32	ひずみ	反力フレーム 受梁	SG3a-v	V	歪ゲージ 単軸
33	ひずみ	反力フレーム 受梁	SG3b-v	V	歪ゲージ 単軸
34	ひずみ	反力フレーム 受梁	SB3c-v	V	歪ゲージ 単軸
35	ひずみ	反力フレーム 受梁	SG3d-v	V	歪ゲージ 単軸
36	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC1	1	歪ゲージ ロゼット
37	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC1	2	歪ゲージ ロゼット
38	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC1	3	歪ゲージ ロゼット
39	ひずみ	反力フレーム 主梁	RC2	1	歪ゲージ ロゼット
40	ひずみ	反力フレーム 主梁	RC2	2	歪ゲージ ロゼット
41	ひずみ	反力フレーム 主梁	RC2	3	歪ゲージ ロゼット
42	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC3	1	歪ゲージ ロゼット
43	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC3	2	歪ゲージ ロゼット
44	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC3	3	歪ゲージ ロゼット
45	ひずみ	反力フレーム 主梁	RG1	1	歪ゲージ ロゼット
46	ひずみ	反力フレーム 主梁	RG1	2	歪ゲージ ロゼット
47	ひずみ	反力フレーム 主梁	RG1	3	歪ゲージ ロゼット
48	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG2	1	歪ゲージ ロゼット
49	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG2	2	歪ゲージ ロゼット
50	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG2	3	歪ゲージ ロゼット
51	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG3	1	歪ゲージ ロゼット
52	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG3	2	歪ゲージ ロゼット
53	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG3	3	歪ゲージ ロゼット

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名
54	変位	反力フレーム 主梁	DG0-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
55	変位	反力フレーム 主梁	DG0-v	V	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
56	変位	反力フレーム 主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
57	変位	反力フレーム 主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
58	変位	反力フレーム 主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
59	変位	反力フレーム 主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
60	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
61	変位	柱ブロック	DB1b-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
62	変位	柱ブロック	DB2a-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
63	変位	柱ブロック	DB2b-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
64	変位	柱ブロック	DB3-x	X	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
65	変位	柱ブロック	DB3-y	Y	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
66	変位	支承	D-u	U	回転角付変位計 DPR-600A(±625mm)
67	角度	支承(仰角)	D-Ru	Ru	回転角付変位計 DPR-600A(±10°)
68	角度	支承(方位角)	D-Rz	Rz	回転角付変位計 DPR-600A(±40°)
69	変位	震動台		X	
70	変位	震動台		Y	
71	変位	震動台		Z	
72	変位	震動台		Rx	
73	変位	震動台		Ry	
74	変位	震動台		Rz	
75	速度	震動台		X	
76	速度	震動台		Y	
77	速度	震動台		Z	
78	速度	震動台		Rx	
79	速度	震動台		Ry	
80	速度	震動台		Rz	
81	加速度	震動台		X	
82	加速度	震動台		Y	
83	加速度	震動台		Z	
84	加速度	震動台		Rx	
85	加速度	震動台		Ry	
86	加速度	震動台		Rz	
87	変位	震動台 入力		X	
88	変位	震動台 入力		Y	
89	変位	震動台 入力		Z	
90	変位	震動台 入力		Rx	
91	変位	震動台 入力		Ry	
92	変位	震動台 入力		Rz	

表 2.A7-2 計測チャンネル表 (荷重計測システム：弾性すべり支承試験体)

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名
1	荷重	支承下部 1	L1-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
2	荷重	支承下部 2	L2-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
3	荷重	支承下部 3	L3-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
4	荷重	支承下部 4	L4-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
5	荷重	支承下部 5	L5-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
6	荷重	支承下部 6	L6-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
7	荷重	支承下部 7	L7-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
8	荷重	支承下部 8	L8-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
9	荷重	支承下部 9	L9-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
10	荷重	支承下部 10	L10-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
11	荷重	支承下部 11	L11-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
12	荷重	支承下部 12	L12-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
13	荷重	支承下部 13	L13-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
14	荷重	支承下部 14	L14-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
15	荷重	支承下部 15	L15-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
16	荷重	支承下部 16	L16-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
17	荷重	支承下部 17	L17-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
18	荷重	支承下部 18	L18-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
19	荷重	支承下部 19	L19-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
20	荷重	支承下部 20	L20-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
21	荷重	支承下部 21	L21-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
22	荷重	支承下部 22	L22-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
23	荷重	支承下部 23	L23-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
24	荷重	支承下部 24	L24-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
25	荷重	支承下部 25	L25-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
26	荷重	支承下部 26	L26-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
27	荷重	支承下部 27	L27-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
28	荷重	支承下部 28	L28-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
29	荷重	支承下部 29	L29-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
30	荷重	支承下部 30	L30-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
31	荷重	支承下部 31	L31-z	Z	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
32	荷重	支承下部 1	L1-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
33	荷重	支承下部 2	L2-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
34	荷重	支承下部 3	L3-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
35	荷重	支承下部 4	L4-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
36	荷重	支承下部 5	L5-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
37	荷重	支承下部 6	L6-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
38	荷重	支承下部 7	L7-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
39	荷重	支承下部 8	L8-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
40	荷重	支承下部 9	L9-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
41	荷重	支承下部 10	L10-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
42	荷重	支承下部 11	L11-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
43	荷重	支承下部 12	L12-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
44	荷重	支承下部 13	L13-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
45	荷重	支承下部 14	L14-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
46	荷重	支承下部 15	L15-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
47	荷重	支承下部 16	L16-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
48	荷重	支承下部 17	L17-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
49	荷重	支承下部 18	L18-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
50	荷重	支承下部 19	L19-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
51	荷重	支承下部 20	L20-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
52	荷重	支承下部 21	L21-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
53	荷重	支承下部 22	L22-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
54	荷重	支承下部 23	L23-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
55	荷重	支承下部 24	L24-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
56	荷重	支承下部 25	L25-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
57	荷重	支承下部 26	L26-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
58	荷重	支承下部 27	L27-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
59	荷重	支承下部 28	L28-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
60	荷重	支承下部 29	L29-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
61	荷重	支承下部 30	L30-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
62	荷重	支承下部 31	L31-u	U	3分力ロードセル LSM-700kN SA85

図④

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名
63	荷重	支承下部 1	L1-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
64	荷重	支承下部 2	L2-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
65	荷重	支承下部 3	L3-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
66	荷重	支承下部 4	L4-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
67	荷重	支承下部 5	L5-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
68	荷重	支承下部 6	L6-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
69	荷重	支承下部 7	L7-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
70	荷重	支承下部 8	L8-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
71	荷重	支承下部 9	L9-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
72	荷重	支承下部 10	L10-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
73	荷重	支承下部 11	L11-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
74	荷重	支承下部 12	L12-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
75	荷重	支承下部 13	L13-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
76	荷重	支承下部 14	L14-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
77	荷重	支承下部 15	L15-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
78	荷重	支承下部 16	L16-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
79	荷重	支承下部 17	L17-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
80	荷重	支承下部 18	L18-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
81	荷重	支承下部 19	L19-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
82	荷重	支承下部 20	L20-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
83	荷重	支承下部 21	L21-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
84	荷重	支承下部 22	L22-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
85	荷重	支承下部 23	L23-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
86	荷重	支承下部 24	L24-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
87	荷重	支承下部 25	L25-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
88	荷重	支承下部 26	L26-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
89	荷重	支承下部 27	L27-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
90	荷重	支承下部 28	L28-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
91	荷重	支承下部 29	L29-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
92	荷重	支承下部 30	L30-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
93	荷重	支承下部 31	L31-v	V	3分力ロードセル LSM-700kN SA85
94	傾斜角	震動台	HG-Ru	Ru	傾斜計 NG2U ±10°
95	傾斜角	反力フレーム 主梁	HT-Ru	Ru	傾斜計 NG2U ±10°
96	変位	反力フレーム 主梁	DG0-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
97	変位	反力フレーム 主梁	DG0-v	V	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
98	変位	反力フレーム 主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
99	変位	反力フレーム 主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
100	変位	反力フレーム 主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
101	変位	反力フレーム 主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
102	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
103	変位	柱ブロック	DB2a-u	U	レーザー変位計 LK-500(±250mm)
104	変位	支承	D-u	U	回転角付変位計 DPR-600A(±625mm)
105	角度	支承 (仰角)	D-Ru	Ru	回転角付変位計 DPR-600A(±10°)
106	角度	支承 (方位角)	D-Rz	Rz	回転角付変位計 DPR-600A(±40°)
107	変位	支承	D1W-z	Z	渦電流式変位計
108	変位	支承	D1E-z	Z	渦電流式変位計
109	変位	支承	D2W-z	Z	渦電流式変位計
110	変位	支承	D2E-z	Z	渦電流式変位計
111	変位	支承	DP-u	U	ポテンシオメータ式変位計 DTP-D-300
112	-	-	-	-	-
113	変位	震動台		X	
114	変位	震動台		Y	
115	変位	震動台		Z	
116	変位	震動台		Rx	
117	変位	震動台		Ry	
118	変位	震動台		Rz	
119	速度	震動台		X	
120	速度	震動台		Y	
121	速度	震動台		Z	

図④

図②

図⑤

図⑥

図③

図③

図③

図③

表 2.A7-3 計測チャンネル表 (温度計測システム：弾性すべり支承試験体)

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名		
1	変位	支承	D-u	U	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)	図⑧
2	角度	支承 (仰角)	D-Ru	Ru	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)	
3	角度	支承 (方位角)	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)	
4	温度	バック鋼板	E1	-	放射温度計	FT-H50	
5	温度	バック鋼板	E2	-	放射温度計	FT-H50	
6	変位	震動台		X			
7	変位	震動台		Y			
8	変位	震動台		Z			
9	温度	震動台上 気温	01	-	K型熱電対		図⑧
10	温度	周囲 気温	02	-	K型熱電対		
11	温度	すべり板	A1	-	K型熱電対		
12	温度	すべり板	A2	-	K型熱電対		
13	温度	すべり板	A3	-	K型熱電対		
14	温度	すべり板	A4	-	K型熱電対		
15	温度	すべり板	A5	-	K型熱電対		
16	温度	すべり板	A6	-	K型熱電対		
17	温度	すべり板	A7	-	K型熱電対		
18	温度	すべり板	A8	-	K型熱電対		
19	温度	すべり板	A9	-	K型熱電対		
20	温度	すべり板	A10	-	K型熱電対		
21	温度	すべり板	A11	-	K型熱電対		
22	温度	すべり板	A12	-	K型熱電対		
23	温度	すべり板	A13	-	K型熱電対		
24	温度	バック鋼板	B1	-	K型熱電対		
25	温度	バック鋼板	B2	-	K型熱電対		
26	温度	バック鋼板	B3	-	K型熱電対		
27	温度	フランジ	C1	-	K型熱電対		

表 2.A7-4 計測チャンネル表 (震動台収録システム：オイルダンパー試験体)

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名	
1	速度	震動台	VTC-x	X	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
2	速度	震動台	VTC-y	Y	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
3	速度	震動台	VTC-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
4	速度	震動台	VTN-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
5	速度	震動台	VTW-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
6	速度	下部ブロック	VBO-u	U	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
7	速度	下部ブロック	VBO-v	V	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
8	速度	下部ブロック	VBO-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
9	速度	反力フレーム 主梁	VG0-u	U	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
10	速度	反力フレーム 主梁	VG0-v	V	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
11	速度	反力フレーム 主梁	VG0-z	Z	サーボ型速度計	VSE-15-G 200kine
12	加速度	反力フレーム 主梁	AGO-u	U	歪型加速度計	AS-100HB 100G
13	加速度	反力フレーム 主梁	AGO-v	V	歪型加速度計	AS-100HB 100G
14	加速度	反力フレーム 主梁	AGO-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G
15	加速度	反力フレーム 主梁	AG1-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G
16	加速度	反力フレーム 主梁	AG2-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G
17	加速度	反力フレーム 受梁	AG3-z	Z	歪型加速度計	AS-100HB 100G
18	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC1a-z	Z	歪ゲージ 単軸	
19	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC1b-z	Z	歪ゲージ 単軸	
20	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC2a-z	Z	歪ゲージ 単軸	
21	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	SC2b-z	Z	歪ゲージ 単軸	
22	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	SC3a-z	Z	歪ゲージ 単軸	
23	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	SC3b-z	Z	歪ゲージ 単軸	
24	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1a-u	U	歪ゲージ 単軸	
25	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1b-u	U	歪ゲージ 単軸	
26	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1c-u	U	歪ゲージ 単軸	
27	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG1d-u	U	歪ゲージ 単軸	
28	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2a-u	U	歪ゲージ 単軸	
29	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2b-u	U	歪ゲージ 単軸	
30	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2c-u	U	歪ゲージ 単軸	
31	ひずみ	反力フレーム 主梁	SG2d-u	U	歪ゲージ 単軸	
32	ひずみ	反力フレーム 受梁	SG3a-v	V	歪ゲージ 単軸	
33	ひずみ	反力フレーム 受梁	SG3b-v	V	歪ゲージ 単軸	
34	ひずみ	反力フレーム 受梁	SB3c-v	V	歪ゲージ 単軸	
35	ひずみ	反力フレーム 受梁	SG3d-v	V	歪ゲージ 単軸	
36	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC1	1	歪ゲージ ロゼット	
37	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC1	2	歪ゲージ ロゼット	
38	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC1	3	歪ゲージ ロゼット	
39	ひずみ	反力フレーム 主梁	RC2	1	歪ゲージ ロゼット	
40	ひずみ	反力フレーム 主梁	RC2	2	歪ゲージ ロゼット	
41	ひずみ	反力フレーム 主梁	RC2	3	歪ゲージ ロゼット	
42	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC3	1	歪ゲージ ロゼット	
43	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC3	2	歪ゲージ ロゼット	
44	ひずみ	反力フレーム 主梁柱	RC3	3	歪ゲージ ロゼット	
45	ひずみ	反力フレーム 主梁	RG1	1	歪ゲージ ロゼット	
46	ひずみ	反力フレーム 主梁	RG1	2	歪ゲージ ロゼット	
47	ひずみ	反力フレーム 主梁	RG1	3	歪ゲージ ロゼット	
48	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG2	1	歪ゲージ ロゼット	
49	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG2	2	歪ゲージ ロゼット	
50	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG2	3	歪ゲージ ロゼット	
51	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG3	1	歪ゲージ ロゼット	
52	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG3	2	歪ゲージ ロゼット	
53	ひずみ	反力フレーム 受梁柱	RG3	3	歪ゲージ ロゼット	

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名	
54	変位	反力フレーム 主梁	DG0-u	U	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
55	変位	反力フレーム 主梁	DG0-v	V	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
56	変位	反力フレーム 主梁	DG1w-z	Z	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
57	変位	反力フレーム 主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
58	変位	反力フレーム 主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
59	変位	反力フレーム 主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
60	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
61	変位	柱ブロック	DB1b-u	U	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
62	変位	柱ブロック	DB2a-u	U	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
63	変位	柱ブロック	DB2b-u	U	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
64	変位	柱ブロック	DB3-x	X	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
65	変位	柱ブロック	DB3-y	Y	レーザー変位計	LK-500 (±250mm)
66	変位	オイルダンパー	D-v	V	回転角付変位計	DPR-600A (±625mm)
67	角度	支承 (仰角)	D-Rv	Rv	回転角付変位計	DPR-600A (±10°)
68	角度	支承 (方位角)	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A (±40°)
69	変位	震動台		X		
70	変位	震動台		Y		
71	変位	震動台		Z		
72	変位	震動台		Rx		
73	変位	震動台		Ry		
74	変位	震動台		Rz		
75	速度	震動台		X		
76	速度	震動台		Y		
77	速度	震動台		Z		
78	速度	震動台		Rx		
79	速度	震動台		Ry		
80	速度	震動台		Rz		
81	加速度	震動台		X		
82	加速度	震動台		Y		
83	加速度	震動台		Z		
84	加速度	震動台		Rx		
85	加速度	震動台		Ry		
86	加速度	震動台		Rz		
87	変位	震動台 入力		X		
88	変位	震動台 入力		Y		
89	変位	震動台 入力		Z		
90	変位	震動台 入力		Rx		
91	変位	震動台 入力		Ry		
92	変位	震動台 入力		Rz		

表 2.A7-5 計測チャンネル表（荷重・温度計測システム：オイルダンパー試験体）

荷重計測システム

ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名	
94	傾斜角	震動台	HG	Ru	傾斜計	NG2U ±10°
95	傾斜角	反力フレーム 主梁	HT	Ru	傾斜計	NG2U ±10°
96	変位	反力フレーム 主梁	DG0-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
97	変位	反力フレーム 主梁	DG0-v	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
98	変位	反力フレーム 主梁	DG1W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
99	変位	反力フレーム 主梁	DG1E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
100	変位	反力フレーム 主梁	DG2W-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
101	変位	反力フレーム 主梁	DG2E-z	Z	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
102	変位	柱ブロック	DB1a-u	U	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
103	変位	柱ブロック	DB2a-u	V	レーザー変位計	LK-500(±250mm)
104	変位	オイルダンパー	D-v	V	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)
105	角度	支承(仰角)	D-Rv	Rv	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)
106	角度	支承(方位角)	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)
107	-	-			-	
108	-	-			-	
109	-	-			-	
110	-	-			-	
111	-	-			-	
112	荷重	オイルダンパー	L0-u	U	ロードセル	TCLP-2MNB 2000kN
113	変位	震動台		X		
114	変位	震動台		Y		
115	変位	震動台		Z		
116	変位	震動台		Rx		
117	変位	震動台		Ry		
118	変位	震動台		Rz		
119	速度	震動台		X		
120	速度	震動台		Y		
121	速度	震動台		Z		

温度計測システム

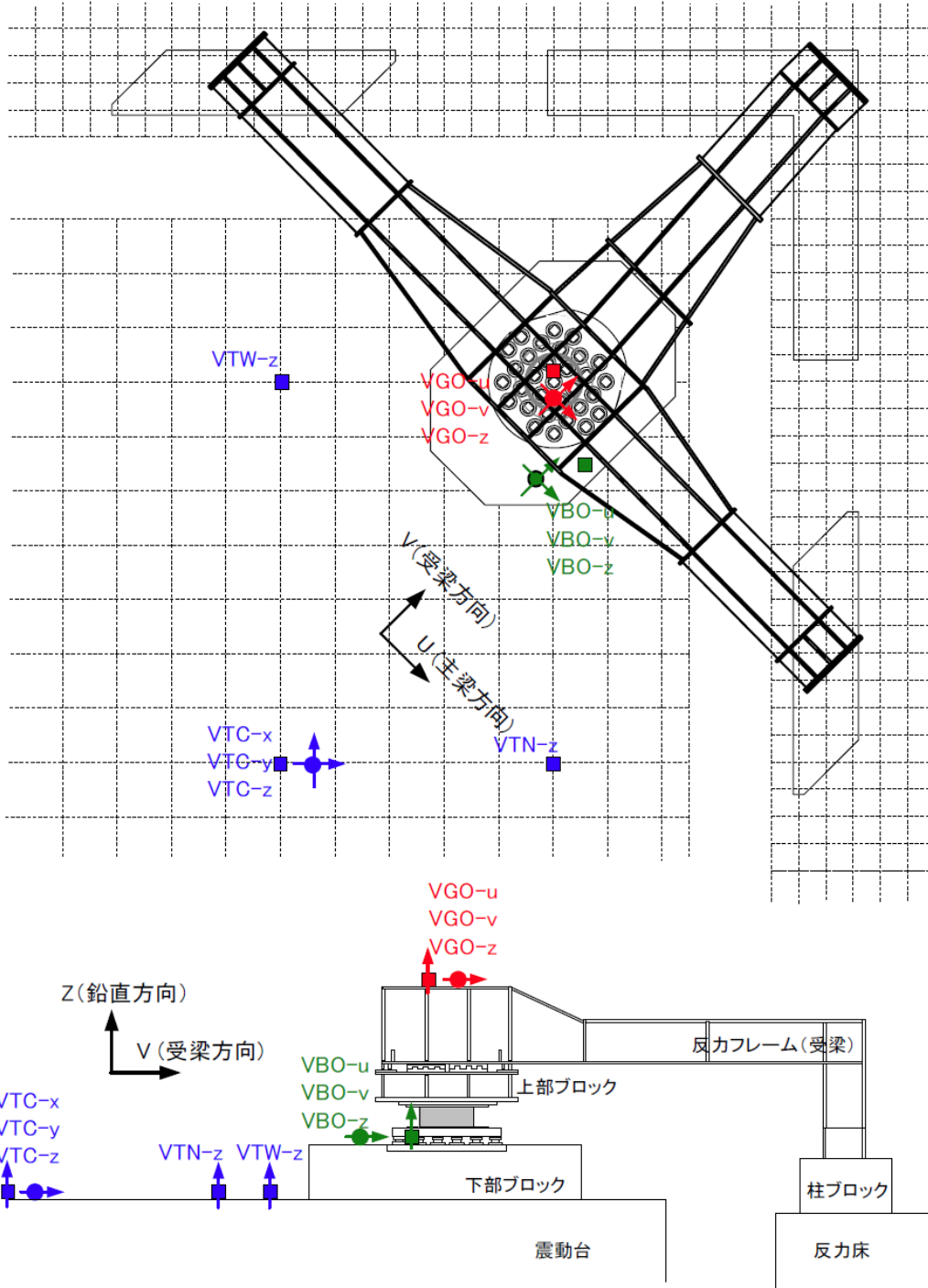
ch	物理量	測点位置	測点名称	方向	センサー名	
1	変位	オイルダンパー	D-v	V	回転角付変位計	DPR-600A(±625mm)
2	角度	支承(仰角)	D-Rv	Rv	回転角付変位計	DPR-600A(±10°)
3	角度	支承(方位角)	D-Rz	Rz	回転角付変位計	DPR-600A(±40°)
4	-	-			-	-
5	-	-			-	-
6	変位	震動台		X		
7	変位	震動台		Y		
8	変位	震動台		Z		
9	温度	震動台上 気温	O1	-	K型熱電対	
10	温度	周囲 気温	O2	-	K型熱電対	
11	温度	タンク内油温度	T1	-	K型熱電対	
12	温度	ベースシエル端部表面	T2	-	K型熱電対	
13	温度	ベースシエル表面	T3	-	K型熱電対	
14	温度	ベースシエル表面	T4	-	K型熱電対	
15	温度	ロッド端部表面	T5	-	K型熱電対	

① 震動台・反力フレーム 速度計

サーボ型速度計: VSE15G 200kine

- → 水平 × 6
- → 鉛直 × 5
- → 水平 × 6
- → 鉛直 × 5

震動台: 水平2成分, 鉛直3成分
 下部ブロック: 水平2成分, 鉛直1成分
 主梁: 水平2成分, 鉛直1成分



測定点図① (震動台・反力フレーム速度)

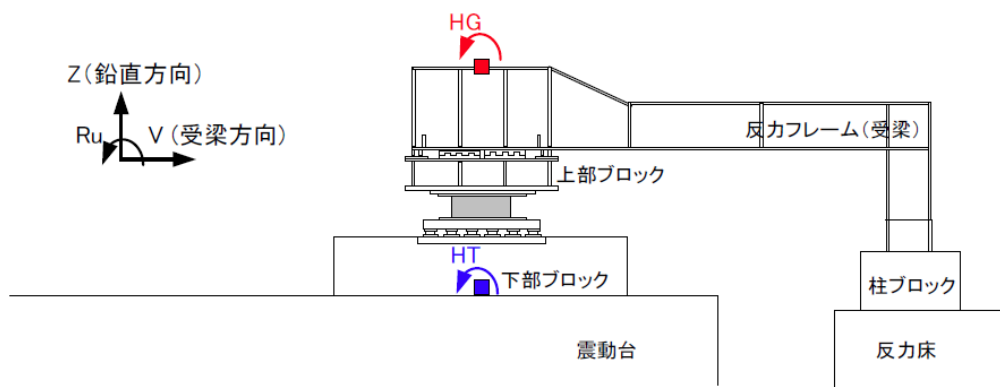
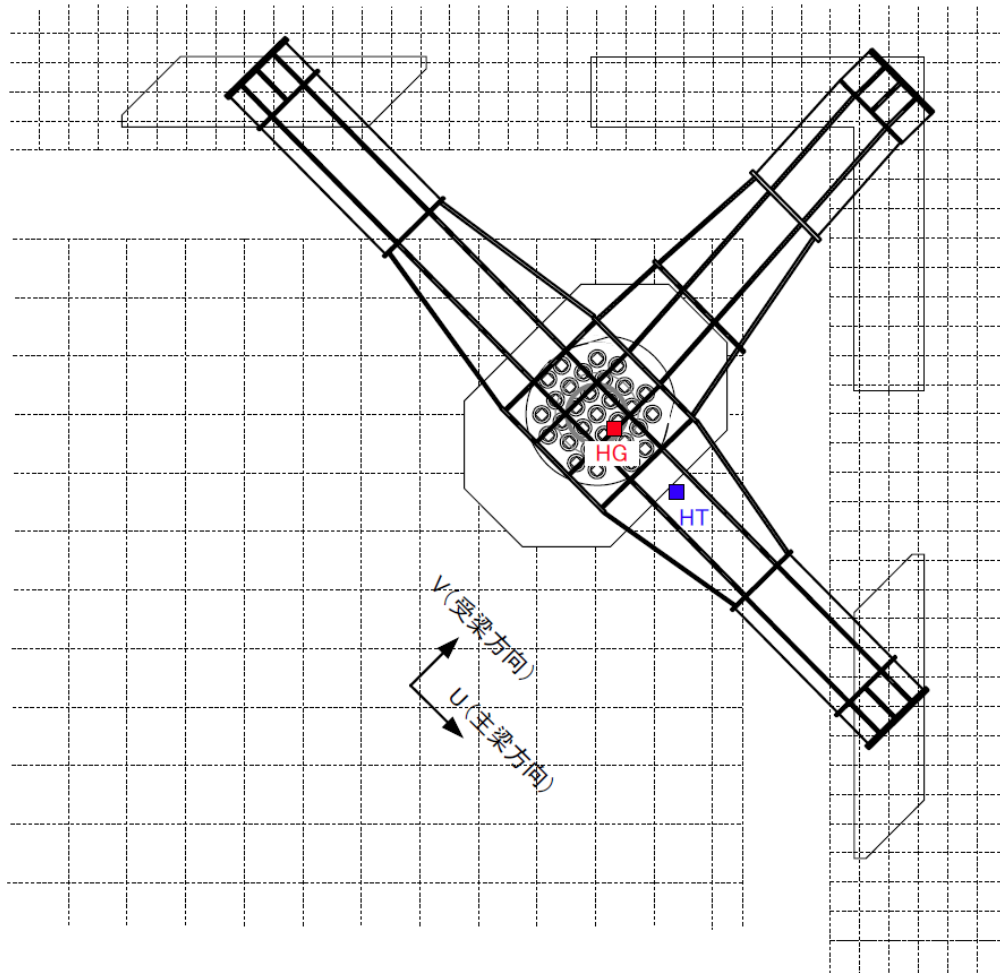
② 震動台・反力フレーム 傾斜計

静電容量型傾斜計: NG2U $\pm 10^\circ$

■ U軸廻り傾斜角 $\times 2$

震動台: U軸廻り傾斜 1成分

主梁: U軸廻り傾斜 1成分



測定点図② (震動台・反力フレーム傾斜)

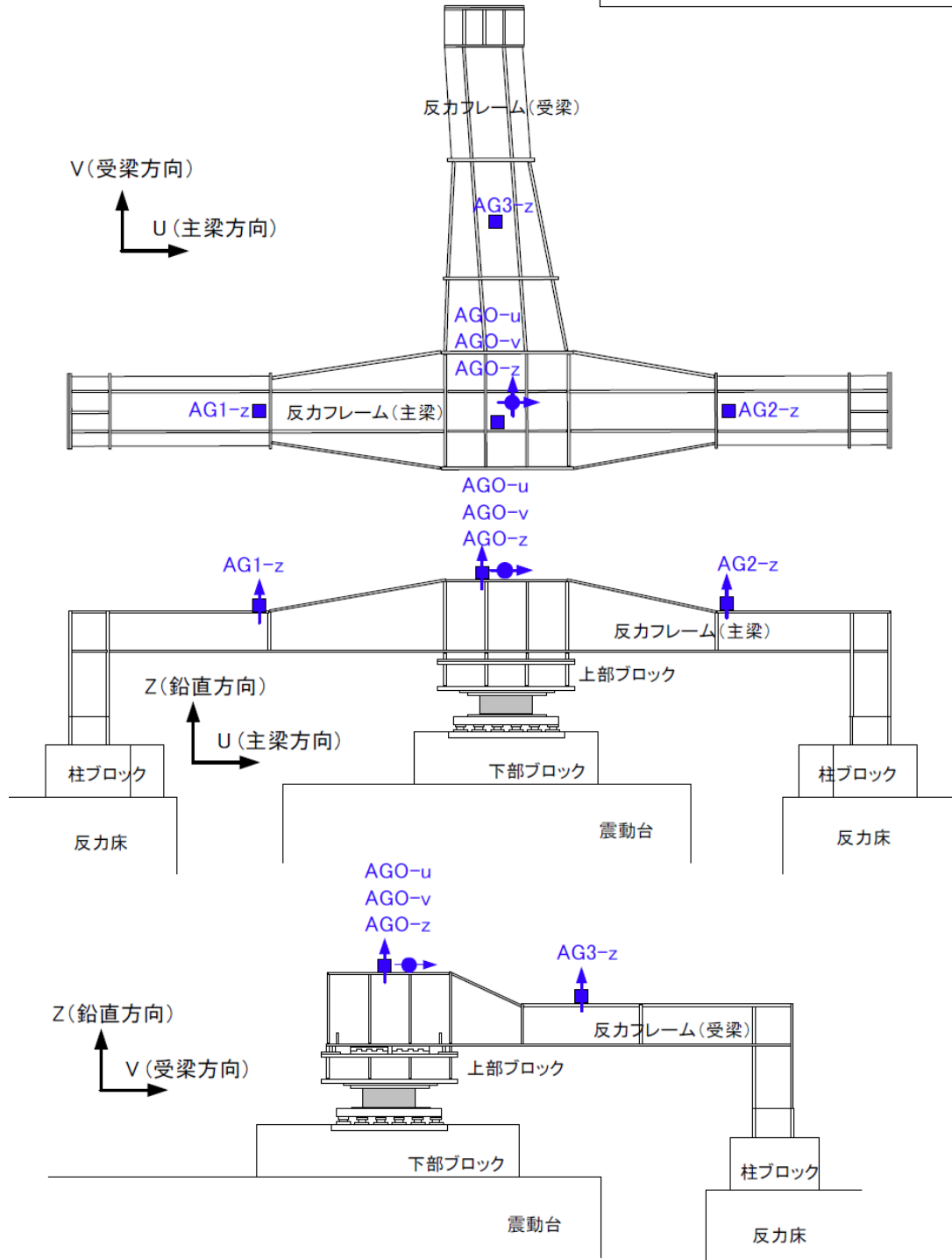
③ 反カフレーム 加速度計

歪型加速度: AS100GHB 100G

● 水平×2 ■ 鉛直×4

主梁: 水平2成分, 鉛直3成分

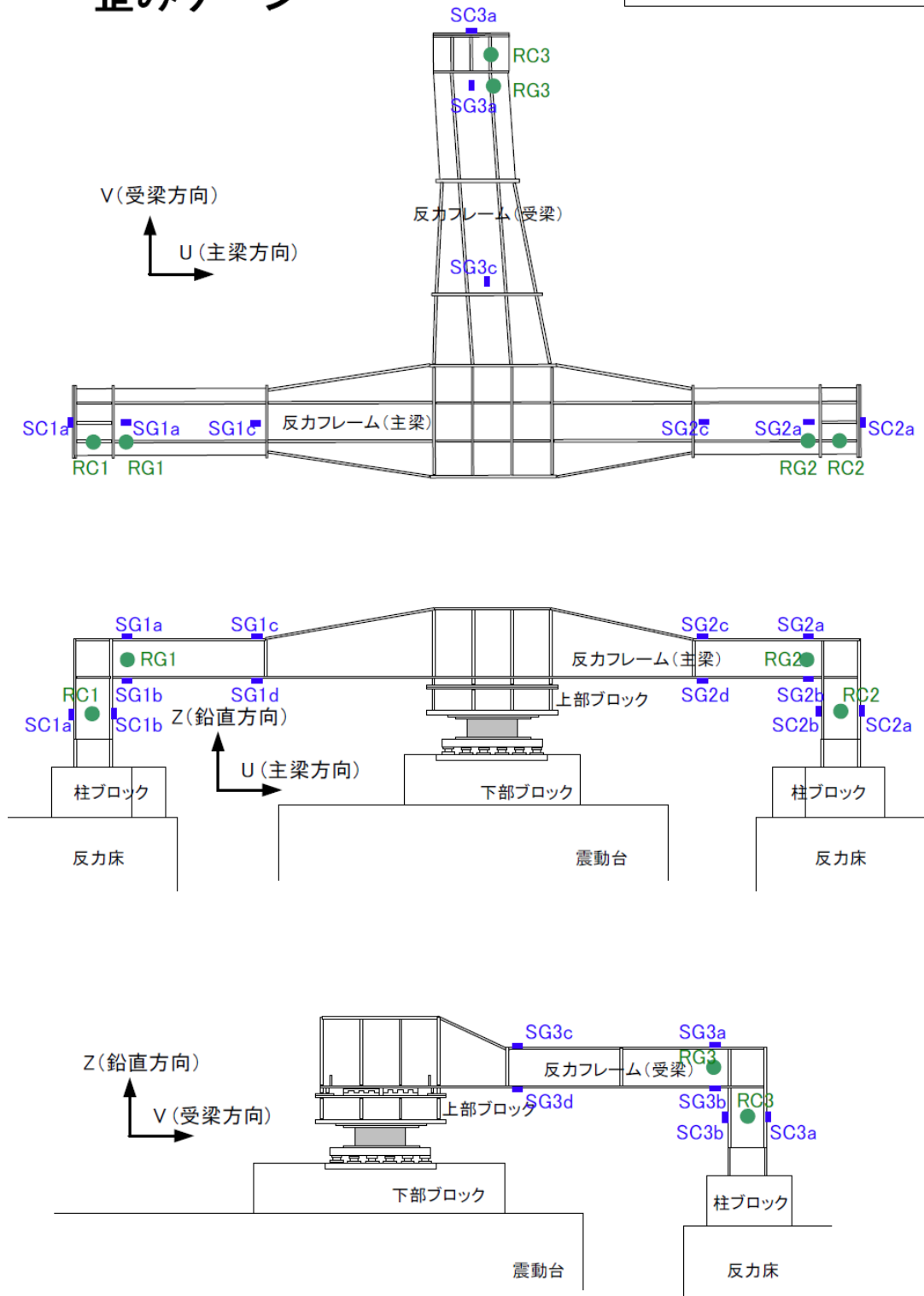
受梁: 鉛直1成分



測定点図③ (反カフレーム加速度)

④ 反カフレーム 歪みゲージ

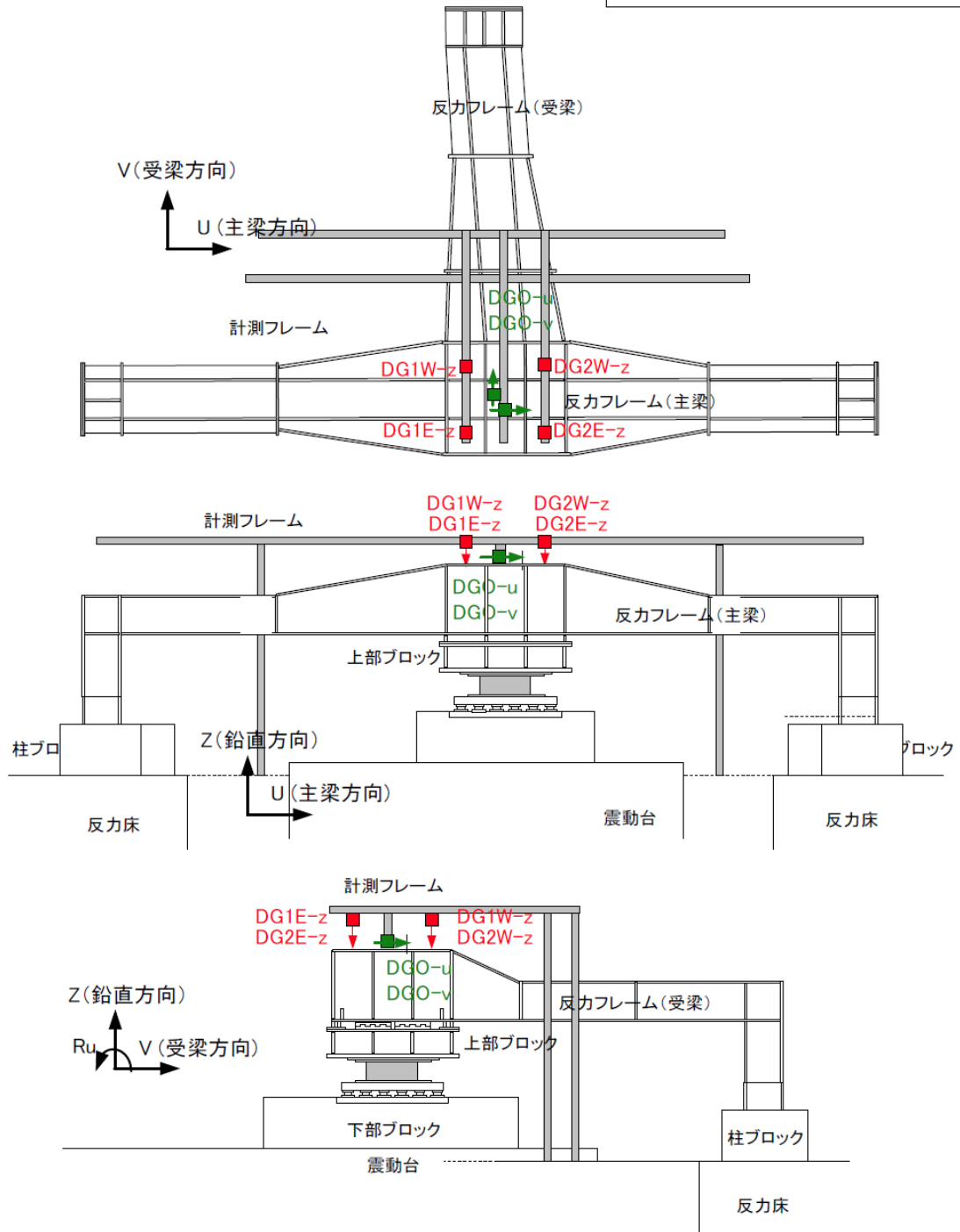
歪みゲージ: 120Ω
 ■ 単軸 × 18 ● ロゼット × 6



測定点図④ (反カフレーム歪みゲージ)

⑤ 反カフレーム 変位計

レーザー変位計: LK500 (±250mm)
 ■ 水平×2 ■ 鉛直×4
 主梁: 水平2成分, 鉛直4成分



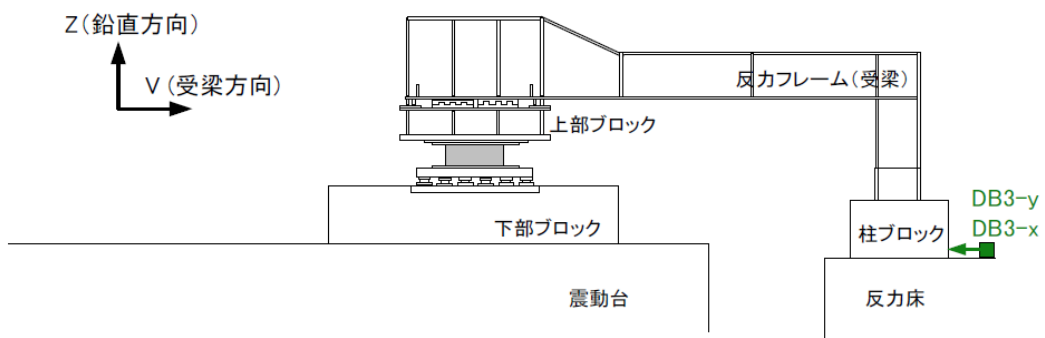
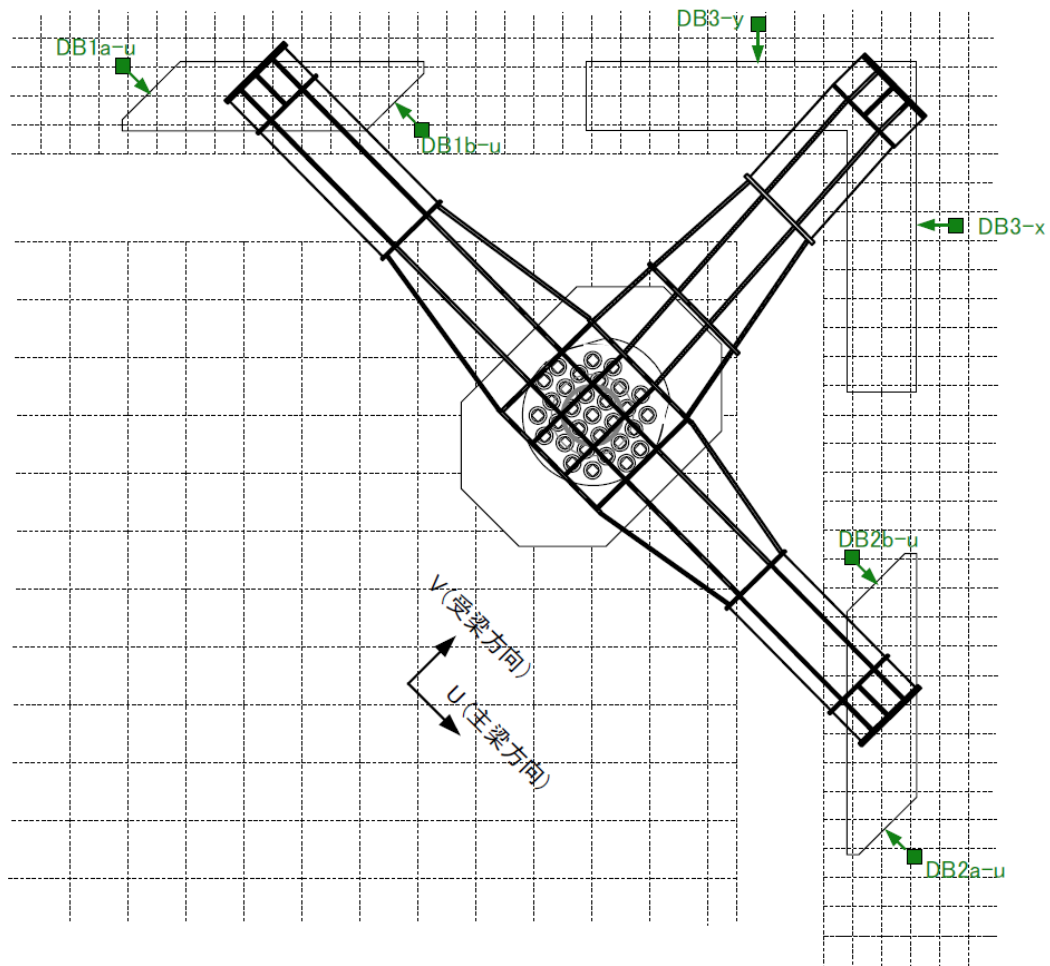
測定点図⑤ (反カフレーム変位)

⑥ 反カフレーム柱ブロック 変位計

レーザー変位計: LK500 (±250mm)

■→ 水平×6

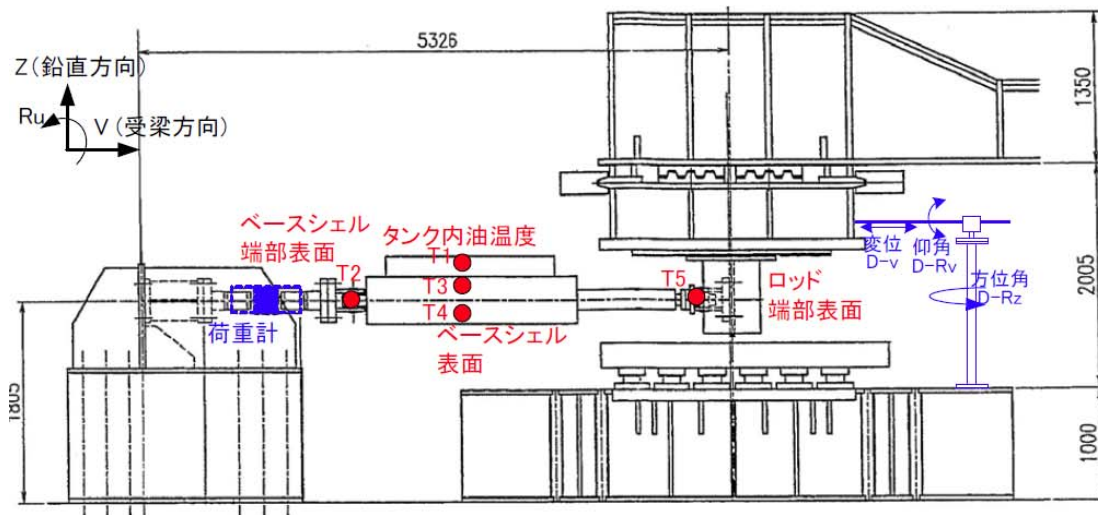
柱ブロック: 水平6成分



測定点図⑥ (反カフレーム柱ブロック変位)

⑦ オイルダンパー 温度・変位・荷重計測

温度計測	
● K型熱電対	5箇所
荷重計測	
□	引張圧縮型荷重計 1台 TCLP-2MNB 2000kN
変位計測	
┌─┴─┐	回転角式変位計 1台 DPR-600A
└─┬─┘	変位 ±625mm, 仰角 ±10°, 方位角 ±40°
	・変位・仰角・方位角 各1成分



測定点図⑦ (オイルダンパー温度・変位・荷重)

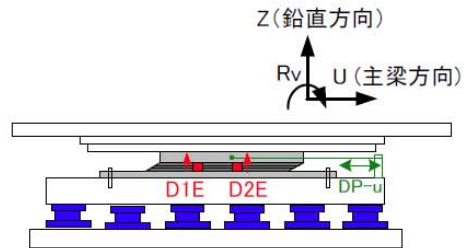
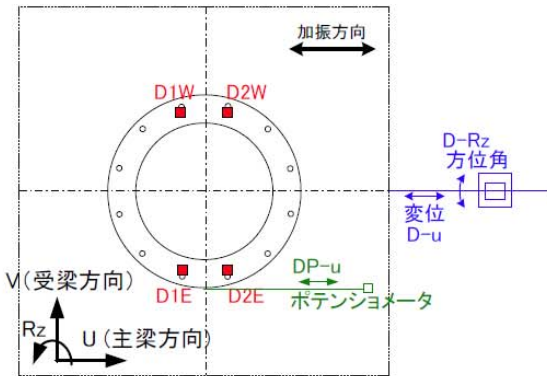
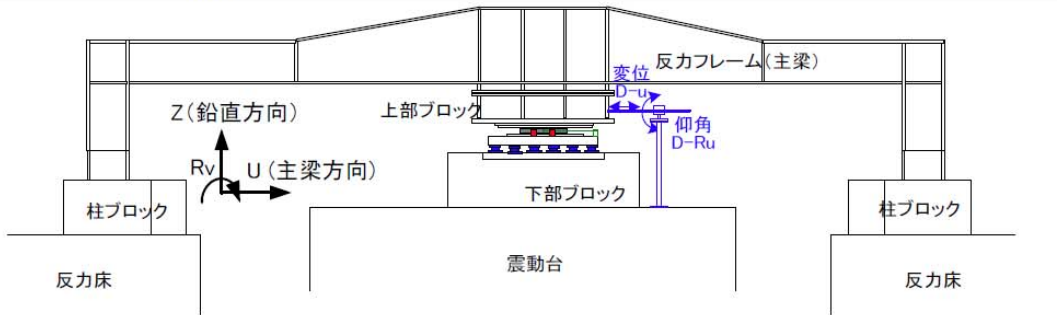
⑧ すべり支承 温度・変位・荷重計測

変位計測

- 渦電流式変位計 ±2mm
鉛直 × 4 (4成分)
- └─┘ 回転角式変位計 1台 DPR-600A
変位 ±625mm, 仰角 ±10°, 方位角 ±40°
・変位・仰角・方位角 各1成分
- ポテンシオメータ式変位計 1台 ±150mm
水平変位 (1成分)

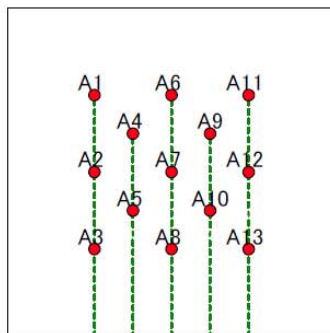
荷重計測

- 3分力センサ: LSM-B-700KNSA85
水平 400kN, 鉛直700kN × 31台

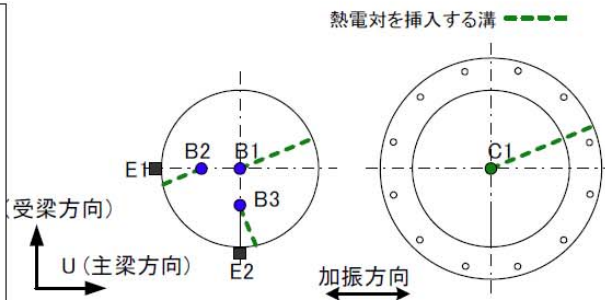


温度計測

- K型熱電対 17箇所
- 放射温度計 FT-H50 2箇所



A: すべり板 (13箇所)



B: バック鋼板 (3箇所+2箇所) C: フランジ (1箇所)

測定点図⑧ (オイルダンパー温度・変位・荷重)

⑨ 試験体
3分力荷重計

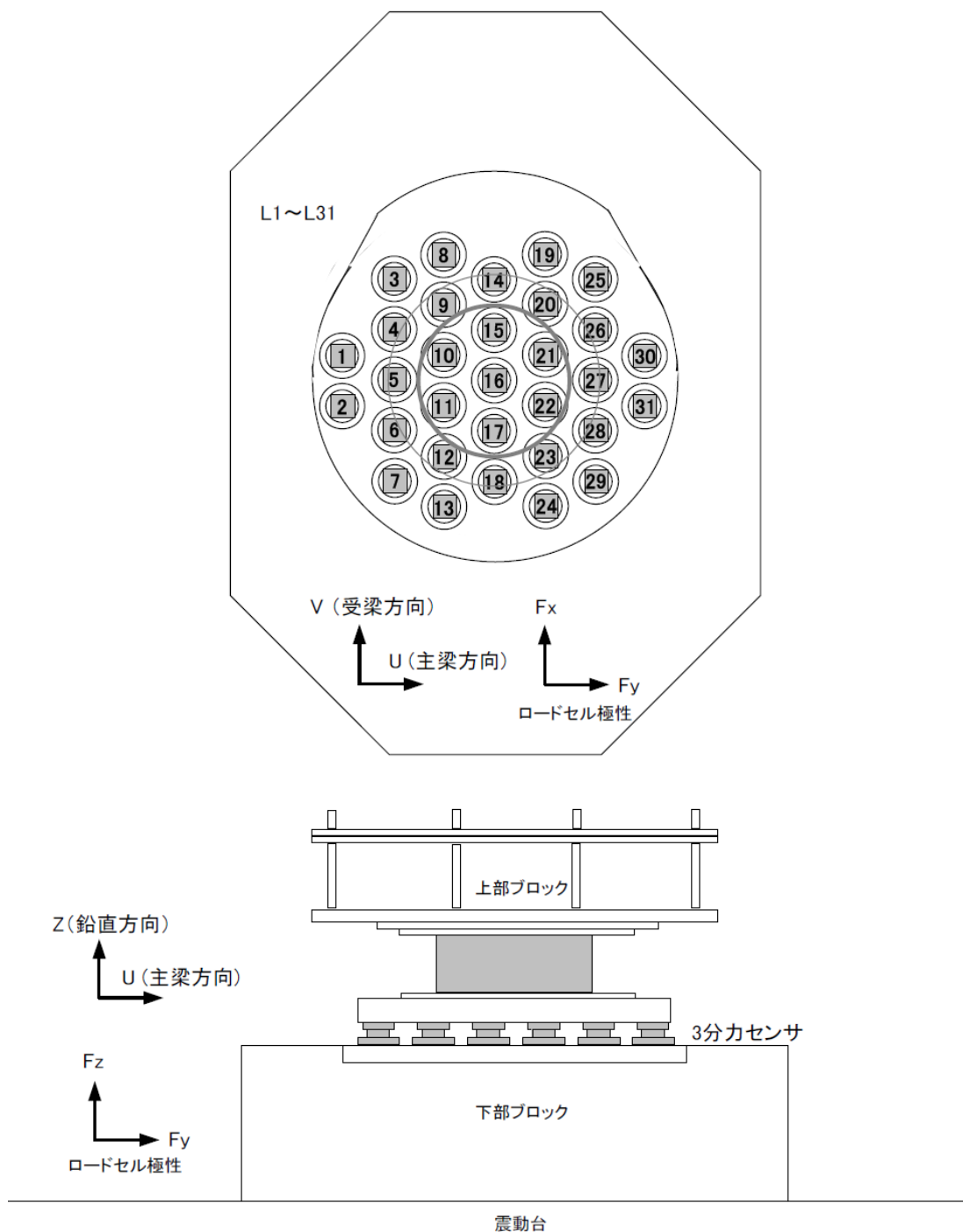
3分力センサ: LSM-B-700KNSA85

水平 400kN, 鉛直700kN × 31

水平U方向 31成分

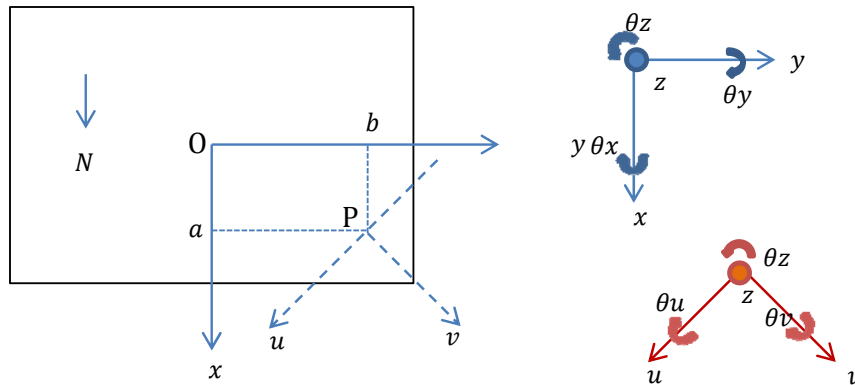
水平V方向 31成分

鉛直Z方向 31成分



測定点図⑨ (オイルダンパー温度・変位・荷重)

2.5.8 参考資料 座標変換の基礎式



座標系を以下のように定義する。

震動台中央 (O 点) 水平面内 : $(x_0, y_0, z_0, \theta x_0, \theta y_0, \theta z_0)$

支承位置 (P 点) 水平面内 : $(u_p, v_p, z_p, \theta u_p, \theta v_p, \theta z_p)$

支承位置 (P 点) 震動台面内 : $(U_p, V_p, Z_p, \theta u_p, \theta v_p, \theta z_p)$

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ \theta x_p \\ \theta y_p \\ \theta z_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & b & -a & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta x_0 \\ \theta y_0 \\ \theta z_0 \end{pmatrix} \quad (2.5.8-1)$$

$$\begin{pmatrix} u_p \\ v_p \end{pmatrix} = \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} \quad (2.5.8-2), \quad \begin{pmatrix} \theta u_p \\ \theta v_p \end{pmatrix} = \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \theta x_p \\ \theta y_p \end{pmatrix} \quad (2.5.8-3)$$

(2.5.8-1)~(2.5.8-3)より、

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta x_0 \\ \theta y_0 \\ \theta z_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & & & & \\ -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & & & & \\ & & 1 & -\sqrt{2}/2(a+b) & \sqrt{2}/2(a-b) & \\ & & & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ z_p \\ \theta u_p \\ \theta v_p \\ \theta z_p \end{pmatrix} \quad (2.5.8-4)$$

水平面内と震動台面内の座標系には以下の関係がある。

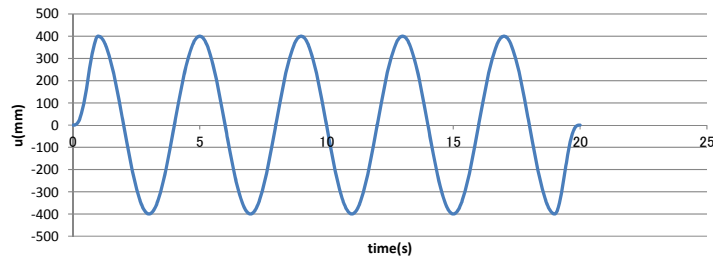
$$\begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta v_p & & \\ -\sin \theta v_p & \cos \theta u_p & \\ & \sin \theta u_p & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_p \\ V_p \\ Z_p \end{pmatrix} \quad (2.5.8-5)$$

したがって、(2.5.8-4)~(2.5.8-5)より、

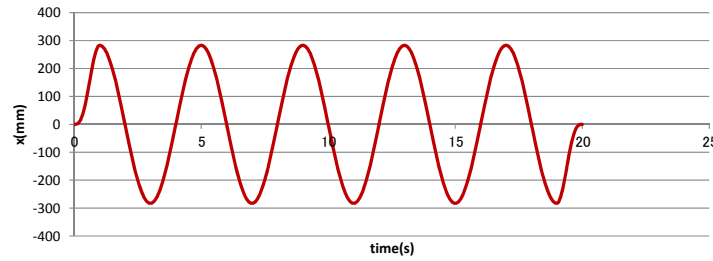
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \theta x_0 \\ \theta y_0 \\ \theta z_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 \cos \theta v_p & \sqrt{2}/2 \cos \theta u_p & & & & \\ -\sqrt{2}/2 \cos \theta v_p & \sqrt{2}/2 \cos \theta u_p & & & & \\ & -\sin \theta v_p & \sin \theta u_p & 1 & -\sqrt{2}/2(a+b) & \sqrt{2}/2(a-b) \\ & & & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_p \\ V_p \\ Z_p \\ \theta u_p \\ \theta v_p \\ \theta z_p \end{pmatrix} \quad (2.5.8-6)$$

2.5.9 参考資料 加振波の例

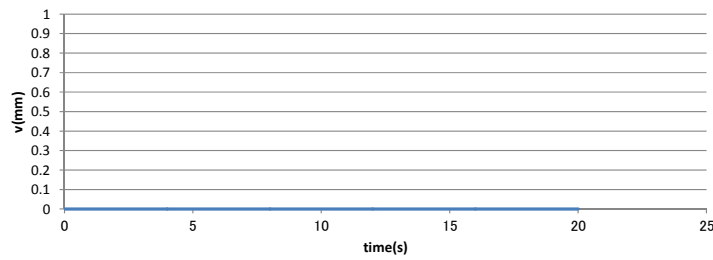
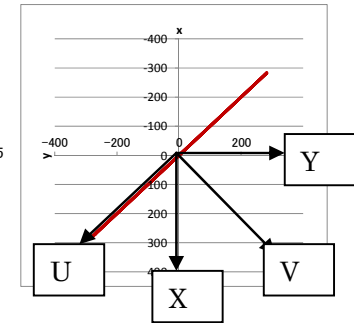
補償波の作成例 (U1-SL5Z : 長周期 (1 方向)、u 方向: 振幅 400mm、周期 4 秒)



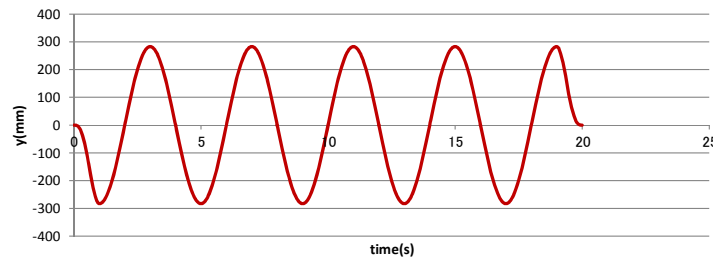
U 成分



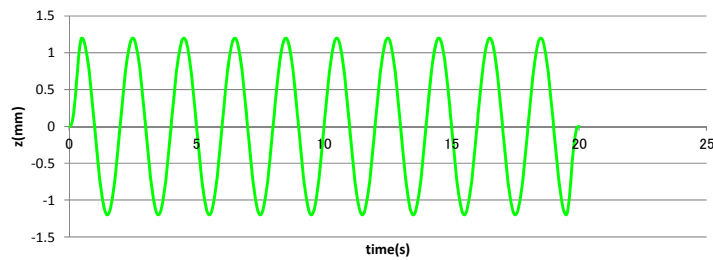
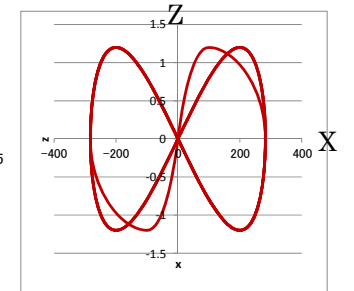
X 成分



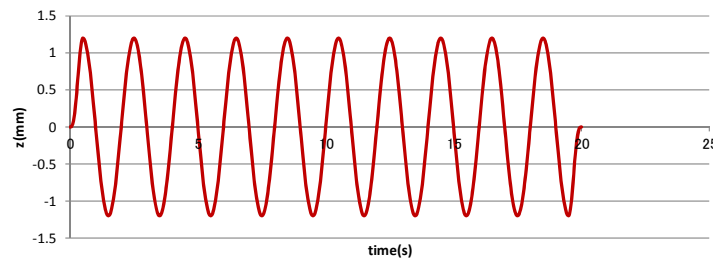
V 成分



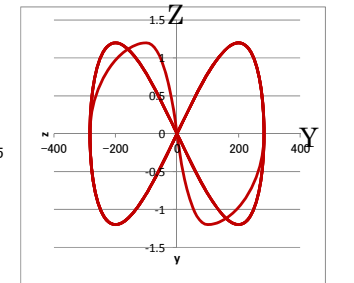
Y 成分



Z 成分



Z 成分



2.5.10 参考資料 フレーム応力度

5MN 鉛直載荷

		応力度(N/mm ²)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	14.2	60.1	73.9	27.0	0.34	0.22
	C2	25.7	59.9	73.3	30.6	0.34	0.24
	C3	3.2	26.5	28.7	12.6	0.13	0.10
梁	G1	22.5	104.2	126.8	41.2	0.59	0.33
	G2	24.3	107.2	131.2	42.7	0.61	0.34
	G3	2.3	36.6	39.0	14.4	0.18	0.12

5MN 鉛直載荷+長周期繰返し加振 (U方向1MN)

		応力度(N/mm ²)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	16.1	65.5	80.7	40.4	0.37	0.32
	C2	29.4	64.4	79.3	42.4	0.37	0.34
	C3	3.5	28.0	30.1	13.8	0.14	0.11
梁	G1	29.2	129.0	158.2	45.0	0.73	0.36
	G2	30.2	128.9	159.1	46.1	0.73	0.37
	G3	3.0	38.5	41.0	18.0	0.19	0.14

5MN 鉛直載荷+長周期繰返し加振 (UV方向0.75MN)

		応力度(N/mm ²)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	15.6	60.3	76.9	37.6	0.35	0.30
	C2	27.6	61.0	75.0	40.0	0.35	0.32
	C3	4.0	29.3	31.5	17.2	0.15	0.14
梁	G1	26.8	120.2	147.1	45.8	0.68	0.37
	G2	28.4	122.7	151.3	43.7	0.70	0.35
	G3	4.9	41.9	42.8	22.5	0.20	0.18

オイル長周期繰返し加振 (V方向1MN)

		応力度(N/mm ²)				許容応力度比(長期)	
		軸	曲げ	軸+曲げ	せん断	軸+曲げ	せん断
柱	C1	0.5	2.6	3.2	1.1	0.01	0.01
	C2	0.9	2.1	2.7	1.1	0.01	0.01
	C3	1.8	1.3	2.8	1.8	0.01	0.01
梁	G1	0.5	2.1	2.2	4.9	0.01	0.04
	G2	0.9	4.0	5.0	4.6	0.02	0.04
	G3	3.3	4.6	8.4	5.9	0.04	0.05

